LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

EXCLUSIF

Les Contes du Canterbury,
une nouvelle inédite de
Hervé Le Tellier
Prix Goncourt 2020 pour *L'Anomalie*

LA FACE CACHÉE DE L'UNIVERS

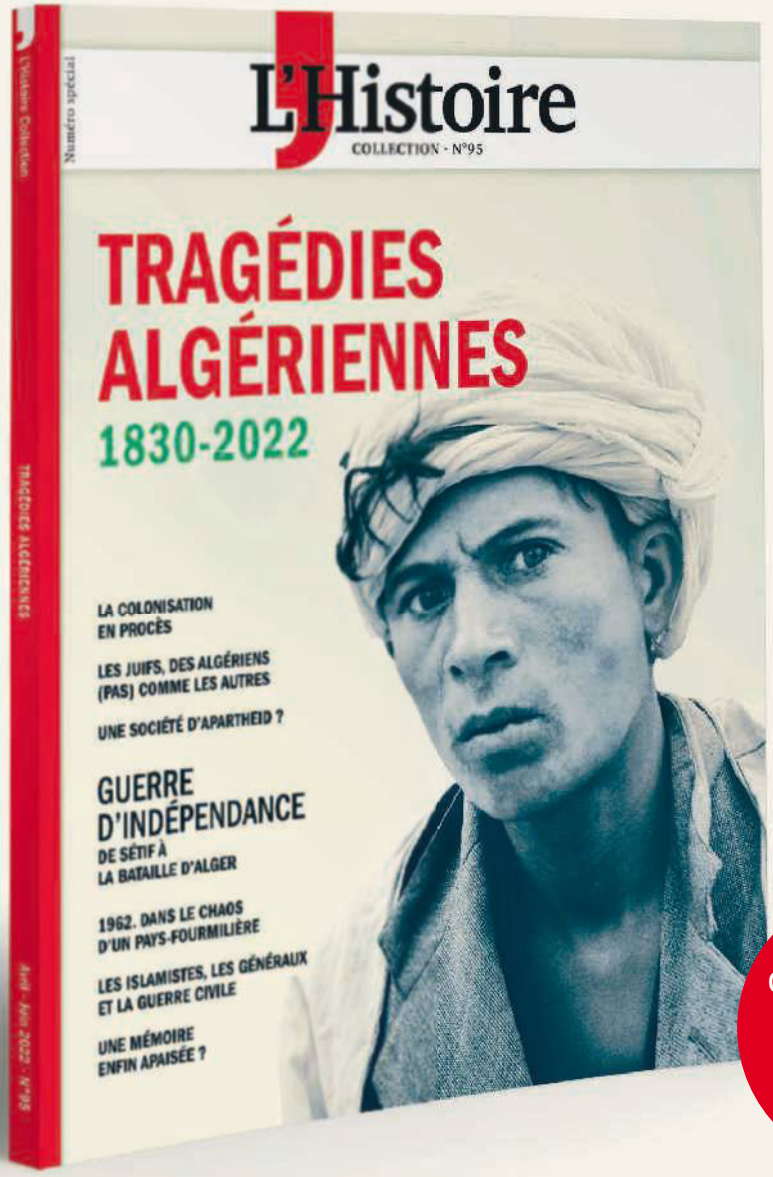
Voyage au cœur d'un trou noir
Europe, Titan, Encelade... des océans sous la glace
Insaisissable matière noire
Le James-Webb à l'assaut des premières étoiles

PATRICE NORMAND/LEEXTRA-OPALE, GETTY IMAGES

L 13667 - 209 H - F: 5,90 € - RD

LES INDISPENSABLES DE SCIENCES ET AVENIR - NUMÉRO SPÉCIAL 209 AVRIL/JUIN 2022 - LA FACE CACHÉE DE L'UNIVERS

NUMÉRO SPÉCIAL 209 AVRIL/JUIN 2022 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20 € / TOM S : 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE : 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 $CAD



LE NOUVEAU
magazine-livre des passionnés d'histoire

Trimestriel
132 pages

Chez votre marchand de journaux et chez votre libraire

Les meilleurs historiens retracent ici le temps long de l'Algérie : les violences de la conquête et du régime colonial, les huit ans d'une guerre qui déchira tous les camps, mais aussi les drames qui ont suivi l'indépendance en 1962. Raccommoder les mémoires implique de regarder en face cette histoire partagée.

L'Histoire
COLLECTION

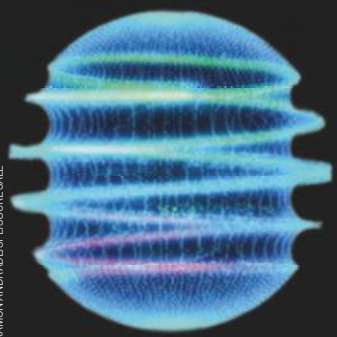
Sommaire

CAROL AND MIKE WERNER/SPL/SUCRE SALÉ

Une nouvelle inédite d'Hervé Le Tellier
Les Contes du Canterbury P. 44

SPITZER TELESCOPE/NASA

Des « briques » de vie sur d'autres planètes ? P. 70

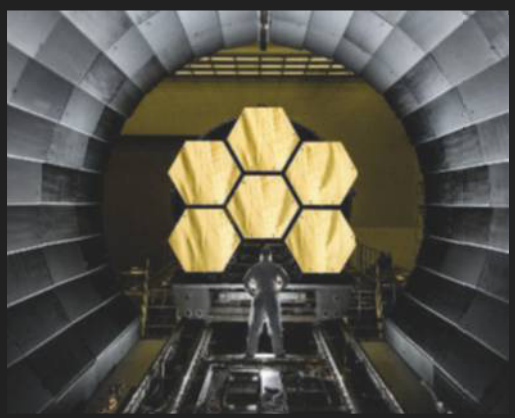


RAMON ANDRADE/SPL/SUCRE SALÉ

Matière noire : être ou ne pas être, éternelle question P. 30

ESO

Au plus près des premières étoiles P. 50



NASA/ZUMA/REA

Les découvertes de demain P. 48

EDITIONS DARGAUD

La fiction explore l'Univers P. 78

5 **Édito**

6 RENCONTRE
Nathalie Palanque-Delabrouille
« 95 % de l'Univers nous échappent encore ! »

10 DU MYTHE À LA SCIENCE
12 Et l'Univers s'élargit jusqu'à l'infini
16 L'éther, substance à tout faire
20 INTERVIEW **Thomas Lepeltier**
« Le modèle du Big Bang pourrait ne pas être bien établi »

21 CAHIER REPÈRES
COMMENT VOIR L'INVISIBLE
22 Décrypter les messages de la lumière
24 Traquer les ondes électromagnétiques
26 En quête de trois autres messagers du cosmos

28 INFINIMENT NOIR
30 Matière noire : être ou ne pas être, éternelle question
35 On a retrouvé la matière manquante !
36 L'énergie noire, obscur moteur du cosmos
40 Voyage au centre du trou noir
43 INTERVIEW **Carlo Rovelli**
« La matière noire pourrait être la manifestation de trous blancs »

44 LES CONTES DU CANTERBURY
Une nouvelle inédite d'Hervé Le Tellier

48 LES DÉCOUVERTES DE DEMAIN
50 Au plus près des premières étoiles
56 Révélations gravitationnelles
61 INTERVIEW
Simone Mastrogiovanni
« Nous avons la méthode, il nous faut les données ! »

62 LA VIE AILLEURS
64 La face cachée du Système solaire
70 Des « briques » de vie sur d'autres planètes ?
74 Recherche E.T. désespérément…

78 LA FICTION EXPLORE L'UNIVERS
Livres, films, séries

L'énergie est notre avenir, économisons-la!

(1)Le calcul des économies est réalisé à partir de données de production issues du site PVGis (prenant en compte l'inclinaison et l'orientation du toit), de données de consommation estimées grâce à la date de construction du logement et le nombre d'occupants (références obtenues avec le rapport RAGE 2014, ADEME) et d'un taux d'autoconsommation fixé à 75%. Le montant en euros est calculé en multipliant les kWh autoconsommés (production solaire multipliée par le taux d'autoconsommation) avec un prix du kWh fixé à 0,2087€ pour les 10 prochaines années. Ce prix est défini sur la base du tarif réglementé Heures Pleines 9kVA applicable au 1er août 2021 sur lequel est appliquée une augmentation de 3% par an sur les 10 prochaines années. Informations données à titre indicatif, qui ne tiennent pas compte des habitudes de consommation, du contrat d'énergie souscrit et de l'éventuelle revente sur le réseau. Exemple pour 1000€ d'économies/an : maison située à Nice (06), orientée plein sud, inclinaison du toit 35° par rapport à l'horizontale, logement construit avant 1980, surface de 130m², chauffage et eau chaude sanitaire fonctionnant à l'électricité, avec climatisation et piscine, composé de 4 personnes, et puissance installée de 4,5kWc. Ce montant n'inclut pas la revente du surplus sur le réseau électrique, ni les aides de l'État.

ENGIE My Power, société par actions simplifiée au capital de 9846000€, dont le siège social est situé 1 place Samuel de Champlain 92400 Courbevoie, immatriculé au registre du commerce et des sociétés de Nanterre sous le n° 849069554. © Getty Images.

LES INDISPENSABLES
SCIENCES ET AVENIR

NUMÉRO SPÉCIAL
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.00.
Fax : 01.55.35.56.04.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale
Dominique LEGLU 56.02
Directrice de la rédaction
Carole CHATELAIN 56.57
Rédaction en chef Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Collaborateur
Olivier LASCAR
Ont collaboré à ce numéro
Jacques-Olivier BARUCH, Bruno BOURGEOIS, René CUILLIERIER, Denis DELBECQ, François FOLLIET, Jean-François HAÏT, Azar KHALATBARI, Françoise ROUX, William ROWE-PIRRA, Vahé TER MINASSIAN, Pierre VANDEGINSTE
Pour joindre la rédaction
01 55 35 56 00 – redaction@sciencesetavenir.fr
Courrier des lecteurs
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel de la REBERDIÈRE 56.06
Assistante de direction Valérie PELLETIER 56.01
Comptabilité compta@challenges.fr
Directeur général Philippe MENAT

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
4, rue de Mouchy – 60438 Noailles Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Publicité Médiaobs
44 rue Notre-Dame-des Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70 / Fax : 01.44.88.97.79
Pour joindre votre correspondant par téléphone, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent à la suite de son nom ; pour adresser un email à votre correspondant, l'initiale de son prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com.
Directrice générale Corinne ROUGÉ 93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGIES 93.70
Directeur délégué Philippe LEONARD 89.18
Directeur de publicité
Sylvain MORTREUIL 97.75
Responsable Web Romain COUPRIE 89.25
Assistante commerciale Séverine LECLERC 39.75
Exécution Nicolas NIRO 89.26
Administration des ventes Caroline HAHN 97.58
Ventes
Directeur commercial
Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40
Directeur des ventes Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
01.55.35.56.62 assisté de Lina QUACH 56.63
Gérance : Claude PERDRIEL
Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service abonnement 45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly, Cedex. Tél. : 03.28.38.47.69. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 e. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 e. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 0620K79712.
Distribué par Presstalis.
Photogravure : Éric BACQUET
Fabrication : Christophe PERRUSSON

PEFC 10-31-1557 Certifié PEFC Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées. pefc-fra.nce.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,016 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Rotofrance Impression, certifié PEFC

ACPM OJD

Édito

GETTY IMAGES

Aventure extraterrestre

Il y a 34 000 ans, pour se repérer dans l'immuable cycle des nuits, un humain – petite bonne femme ? petit bonhomme ? – entaillait un os de renne d'une série de 69 encoches représentant, selon les archéologues, les phases de la Lune. C'était en Dordogne, dans l'abri Blanchard, et l'os est aujourd'hui le premier témoignage d'une volonté de maîtriser l'infini, d'asseoir des certitudes sur ce qui nous dépasse. En un mot, d'accroître les connaissances, ce qui est bien le propre de l'homme. Transformer l'inconnu en connu, l'invisible en visible… n'est-ce pas le but de toute science ? Petit bonhomme, petite bonne femme ? Plutôt premier ou première savant(e) !

Mais s'attaquer à l'Univers… le défi est de taille ! Avait-il l'intuition, cet humain du paléolithique, que la danse lente des étoiles et des planètes au long des saisons ne délimitait qu'une minuscule fraction du cosmos ? Jusqu'à l'astrophysicien Edwin Hubble – il y a à peine plus de cent ans –, celui-ci, immuable et éternel, se réduisait à une seule galaxie, la nôtre. Depuis, les cosmologistes ont révélé qu'il avait une histoire mouvementée et comprenait des milliards de galaxies riches elles-mêmes de milliards d'étoiles… À donner le vertige ! L'Univers se dilate, mais le questionnement demeure : que cache-t-il ? Avouons-le, si le ciel nous fascine tellement, c'est que les mystères qu'il recèle sont inconcevables. C'est à une visite guidée du cosmos, destinée à déchiffrer quelques-unes de ces énigmes, que nous vous convions dans ce numéro. Voyageurs intergalactiques, nous découvrirons dans notre proche banlieue les aurores boréales et océans de glace des lunes de Jupiter. En nous enfonçant dans les profondeurs du temps et de l'espace, nous nous laisserons fasciner par des spectacles inouïs : tourbillons de trous noirs en fusion, quasars cent mille milliards de fois plus brillants que le Soleil, flots de matière lumineuse s'écoulant le long des filaments galactiques… Et nous découvrirons la face obscure d'un Univers gonflé par l'énigmatique énergie sombre, travaillé par une matière noire si discrète que les cosmologistes doutent aujourd'hui de son existence même.

Dans cette aventure extraterrestre, nous ne serons pas seuls : l'écrivain Hervé Le Tellier, qui a régalé nombre d'entre nous avec son roman *L'Anomalie*, nous fait le plaisir de nous donner pour compagnons des astronautes du futur, inventeurs de mondes étranges… mais je vous laisse savourer ses *Contes du Canterbury* !

Si ce voyage est inenvisageable dans la réalité, les astrophysiciens ont d'autres moyens de l'entreprendre. Et il y a urgence ! Car la discipline est en crise : désaccords sur l'expansion, sur les premiers instants de l'Univers… Faut-il mettre le cosmos cul par-dessus tête, ranger les théories qui semblaient si solides au placard céleste ? Seules des observations pourront trancher. Aussi sont mis en service, ou sur le point de l'être, des instruments extraordinairement sophistiqués : Euclid, Vera-Rubin, James-Webb ou Desi, conçus précisément pour observer au plus près cet Univers caché. N'en doutons pas : les dix années qui viennent vont trancher bien des questions, et, ce faisant, en soulever de nouvelles. Une perspective excitante, n'est-ce pas ?

FLORENCE LEROY

Rencontre

NATHALIE PALANQUE-DELABROUILLE
Cosmologiste, directrice du département de physique
du Lawrence Berkeley National Laboratory, Californie

« 95% de l'Univers nous échappent encore ! »

Nous n'avons pas fini d'être surpris ! se réjouit la cosmologiste, qui nous décrit les méandres de l'Univers invisible et les ambitieux projets mis en œuvre pour en percer les mystères.

Ce hors-série s'intitule « La face cachée de l'Univers ». Qu'est-ce que cela évoque pour vous ?
C'est directement le cœur de mon domaine de recherche : la matière noire et l'énergie noire. Les cosmologistes se sont d'abord intéressés à ce qu'ils pouvaient voir, étoiles, planètes, galaxies, mais ils se sont aperçus que cette matière visible était loin d'être suffisante. Elle ne représente que 5 % de la matière contenue dans le cosmos. L'essentiel est invisible : c'est ce qu'on appelle d'une part la matière noire, et d'autre part une énergie inconnue, exotique, ni matière, ni rayonnement : une énergie dite noire – ou sombre – qui domine, à 70 %. La face cachée de l'Univers, c'est donc tout ce que l'on en ignore encore, à savoir près de 95 % !

Où en est-on dans la traque de la matière noire ?
On sait depuis quelques décennies qu'une grande partie de la masse des galaxies n'est pas lumineuse, qu'il y a un facteur 10 entre ce que l'on calcule et ce que l'on observe. Or, si les observations sont indiscutables, sur l'interprétation, tout le monde est d'accord pour dire qu'il y a désaccord… On a d'abord cherché cette matière manquante sous la forme d'objets ordinaires que l'on ne voyait pas, tout simplement parce qu'ils n'émettent pas de lumière. C'est d'ailleurs comme cela que j'ai commencé ma carrière : je travaillais sur une expérience où l'on tentait de voir dans notre galaxie si une partie de cette matière ne pouvait pas être constituée d'étoiles avortées ou de planètes. Une hypothèse qui, en l'absence d'observations concluantes, a fini par être balayée.
On dispose aujourd'hui d'indications qui montrent que la matière ordinaire – celle dont nous sommes composés, humains comme étoiles – ne peut représenter l'essentiel de la matière noire. L'hypothèse la plus vraisemblable, c'est qu'elle est constituée par une particule non encore identifiée. Les plus recherchées sont les Wimps (Weakly Interacting Massive Particles), qui sont prédites par certaines théories de physique fondamentale. Elles n'interagiraient quasiment pas et seraient très difficiles à détecter. Leur traque n'a toujours rien donné, et ça commence vraiment à sentir le roussi pour elles… Il y a foison de modèles alternatifs, basés sur d'autres particules, tels les axions – bien plus légers que les Wimps… mais pas encore détectés non plus.

Se pourrait-il que la matière noire n'existe pas ?
Là est la question ! Si l'on ne trouve aucune particule, ne faut-il pas se dire que nous n'avons pas bien interprété les observations ? Qu'il n'y aurait pas de masse manquante, mais que c'est notre modèle interprétant la masse qui est erroné ? Il faudrait alors modifier les lois de la gravité, ce qui veut dire remettre en question la relativité générale… Un sacré coup de pied dans l'édifice théorique, qui explique tout de même extrêmement bien le monde qui nous entoure !

> « Les cosmologistes se sont d'abord intéressés à ce qu'ils pouvaient voir – étoiles, planètes, galaxies – avant de s'apercevoir que cette matière visible était loin d'être suffisante

Nathalie Palanque-Delabrouille

Directrice, depuis août 2021, du département de physique du Lawrence Berkeley National Laboratory (Californie, États-Unis), elle est également, en France, directrice de recherche à l'Irfu (l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers) au CEA et membre de l'Académie des sciences. Ses travaux portent sur l'évolution et la composition de l'Univers, en particulier sur la matière noire et l'énergie noire. Elle est très engagée dans la vulgarisation scientifique.

Parmi ses ouvrages :

Les Nouveaux Messagers du cosmos, avec Jacques Delabrouille, Seuil, 2011

Voir aussi l'interview Twitch réalisée avec *Sciences et Avenir* le 18 février 2021 : https://sciav.fr/palanque

Mais attention à ne pas modifier les lois à la légère, ce qui nécessiterait de revalider l'intégralité des observations. Très peu de modèles alternatifs sont satisfaisants. Le premier du genre, que l'on appelle MOND (Modified Newtonian Dynamics) – et qui a initié un grand nombre de développements théoriques plus performants – consiste à dire que les lois de la gravité sont « presque » celles d'Einstein, mais avec de petites modifications. Il a cependant été fortement contredit par les observations.

L'autre aspect de vos travaux, c'est l'énergie noire…

On a envisagé dès les années 1920 que l'Univers, que l'on pensait alors constitué de matière, était en expansion. Or la matière, par son influence gravitationnelle, a tendance à ralentir celle-ci, et en 1998, deux groupes de chercheurs ont cherché à mesurer ce ralentissement. Ils ont observé des supernovae – des étoiles qui explosent lorsqu'elles atteignent 1,4 fois la masse de notre Soleil – à différentes époques de l'histoire de l'Univers. Entre parenthèses, c'est un des grands miracles de la cosmologie : voir le passé ! La lumière se propageant à vitesse finie, lorsqu'on regarde des objets lointains, on les regarde dans le passé… Mais ces chercheurs ont en réalité constaté une accélération ! Cette observation inattendue, totalement contradictoire avec un Univers de matière, a obligé toute la communauté scientifique à revoir son modèle : quelle composante permettait cette accélération de l'expansion ? L'hypothèse qui s'est imposée, la plus simple, est celle d'une énergie – l'énergie sombre.

On n'observe donc pas toujours ce que l'on cherche ?

Absolument pas ! J'ai une flopée d'exemples pour lesquels le résultat auquel on aboutit est en contradiction flagrante avec ce qu'on recherche. Voyez les sursauts gamma, des explosions de photons gamma extrêmement intenses, dont on ignore encore ◆◆◆

◆◆◆ l'origine. Ils ont été découverts en 1970 par des satellites américains chargés de surveiller la non-prolifération nucléaire. Et que dire de l'expérience de Michelson-Morley ? En 1887, alors que ces deux physiciens cherchent en vain à mettre en évidence « l'éther », censé être le support de la propagation de la lumière, ils parviennent à l'étrange conclusion que la vitesse de la lumière est constante… ce qui, quelques années plus tard, donnera naissance aux rudiments de la relativité restreinte.

C'est presque un plaidoyer pour la recherche fondamentale…
Oui, j'y crois très fortement. Construire des instruments, les caractériser au plus près et ne pas nécessairement s'intéresser à leur application immédiate mais être prêt à pousser les études dans un sens différent de l'application initiale.

À propos d'instruments, quels sont ceux dont les missions s'annoncent les plus prometteuses ?
J'en mentionnerai trois, dont le but est justement de comprendre la face cachée de l'Univers : l'observatoire Vera-C.-Rubin (appelé auparavant LSST), un télescope optique américain installé au Chili, qui devrait entrer en service cette année ; le satellite européen Euclid, qui sera lancé en avril 2023 et qui observera à la fois en lumière visible et en infrarouge ; et Desi (Dark Energy Spectroscopic Instrument), un télescope au sol spécifiquement voué à la traque de l'énergie noire. Il est fondamental d'avoir plusieurs instruments qui s'intéressent à cette problématique de manière différente, peuvent valider leurs observations respectives et compléter les approches en vue d'une interprétation générale.
Ces grands instruments ont pour but de cartographier en trois dimensions la matière noire et l'énergie noire à travers les âges de l'Univers, afin de déterminer leur nature et leurs propriétés. La troisième dimension, la profondeur, ne peut s'obtenir finement que par spectroscopie : c'est la mission de Desi, qui va mesurer le spectre d'une sélection d'objets afin d'avoir l'information du décalage vers le rouge, c'est-à-dire la vitesse de leur déplacement, ce qui peut, moyennant un modèle cosmologique, s'apparenter à une distance. Cette cartographie en 3D va nous permettre de mesurer la distance privilégiée entre les galaxies à différentes époques, ce qui revient à étudier comment l'Univers s'est agrandi à travers le temps et donc, son expansion étant régie par ce qui le compose, la quantité de matière et d'énergie à différentes époques.

Une approche différente de celle du Vera-Rubin ?
Le Vera-Rubin, lui, apportera l'observation de supernovae à différentes époques – approche qui a conduit à la découverte de l'accélération de l'expansion. On passera toutefois de quelques centaines à des centaines de milliers, ce qui permettra de les classifier selon l'environnement dans lequel elles ont évolué. L'objectif est d'obtenir une interprétation plus fine de la quantité d'énergie noire à différentes époques : a-t-elle toujours existé ? Sa contribution est-elle constante dans le temps ? Est-ce une constante cosmologique, comme cela semble être l'explication la plus simple aujourd'hui, ou faut-il invoquer des modèles plus complexes ? Euclid, lui, se concentrera notamment sur la distribution de la masse de l'Univers pour étudier la matière noire.

Vous disiez que l'énergie noire n'a pas toujours existé ?
Pardon, c'est mal exprimé ! C'est moi qui l'ai dit, je l'avoue *(rire)*. L'énergie noire a toujours été présente, mais la grosse différence entre énergie noire et toute forme de matière, c'est que l'énergie noire serait un fluide à densité indépendante du temps. Tandis que la densité de la matière, elle, décroît avec l'expansion. Si l'on met trois billes dans un verre, elles seront plus proches que si on les met dans le volume d'une pièce… L'énergie noire domine aujourd'hui, mais si l'on regarde un Univers extrêmement jeune, on n'en voit pas, parce que la matière est alors en densité considérablement plus importante.

> « Toute notre cosmologie repose sur l'inflation, qui a eu lieu dans la première fraction de seconde après le Big Bang. Or, nous n'en avons toujours aucune preuve tangible

Revenons à Desi… vous y êtes très impliquée ?
Oui, j'encadre l'ensemble des activités scientifiques au sein de ce projet dont je suis porte-parole. C'est un télescope de quatre mètres de diamètre situé en Arizona, qui comporte 5 000 petits robots dans le plan focal pouvant positionner, en temps réel, des fibres optiques à la position exacte des galaxies dont on veut mesurer le spectre. Toutes les vingt minutes, on sélectionne un jeu de 5 000 galaxies. On a commencé à récolter des données en mai 2021, et le bilan est déjà spectaculaire : on a pu mesurer la distance, la troisième dimension, de plus de 10 millions de galaxies. C'est la première fois qu'on a une cartographie des données continue et systématique sur 12 milliards d'années, ce qui couvre l'essentiel

> Que d'autres formes de vie, différentes de celles que nous connaissons, soient apparues dans le Système solaire me semble plus que probable

de l'histoire de l'Univers – 13,8 milliards d'années, selon le modèle standard. **Nous produirons d'ailleurs un film 3D, et tout un chacun pourra se balader dans ces champs de galaxies…** On peut déjà se rendre compte des grandes structures de l'Univers : des zones riches en galaxies, d'autres où il est essentiellement vide. On voit les filaments galactiques, la trame cosmique... Esthétiquement, c'est fabuleux, et sur le plan scientifique, cela comporte un grand nombre d'informations indispensables à la mesure de l'expansion.

Desi s'intéresse aussi aux trous noirs supermassifs qui siègent au centre des quasars, les objets les plus lointains qu'on puisse voir, parce qu'ils font briller intensément la matière qui les entoure avant qu'elle ne tombe à l'intérieur. Les trous noirs comptent pour moi parmi les objets les plus fascinants du cosmos. Et, par-dessus tout, le fait qu'il en existe de tout petits – des étoiles en fin de vie – et d'autres absolument monumentaux – de plusieurs centaines de millions de masses solaires, au cœur des galaxies – dont on ignore encore les mécanismes de formation. Et l'on vient d'observer des trous noirs dont la masse ne correspond pas à ce que la théorie prédisait. On n'a pas fini d'être surpris !

D'autres programmes sont-ils déjà sur orbite pour aller plus loin dans notre découverte du cosmos ? Qu'en est-il du James-Webb Space Telescope, lancé en décembre dernier ?

Les projets en cours vont couvrir la décennie, et l'on est en train de réfléchir aux pistes les plus prometteuses pour la décennie suivante. Il y a des centaines de propositions. Outre le contenu de l'Univers, l'autre grande inconnue est l'inflation (à ne pas confondre avec l'expansion), qui a eu lieu dans la première fraction de seconde après le Big Bang. Nous n'en avons toujours aucune preuve tangible. Or, toute notre cosmologie repose sur un instant inflationnaire… Il nous faudrait un instrument spatial capable de récolter des mesures précises du fonds diffus cosmologique, la première lumière émise par l'Univers, afin d'avoir le dernier mot sur cette époque d'inflation. Des projets qu'il faut planifier sur un demi-siècle ! Le James-Webb, lui, a pour mission principale d'étudier l'origine du cosmos plutôt que sa face cachée : il part à la découverte des premiers astres. Quels sont les grumeaux qui ont formé ces premières étoiles dont on pense qu'elles sont extrêmement massives, qu'elles ont des propriétés très différentes de celles que l'on observe aujourd'hui ?

Et au-delà de l'Univers visible ?

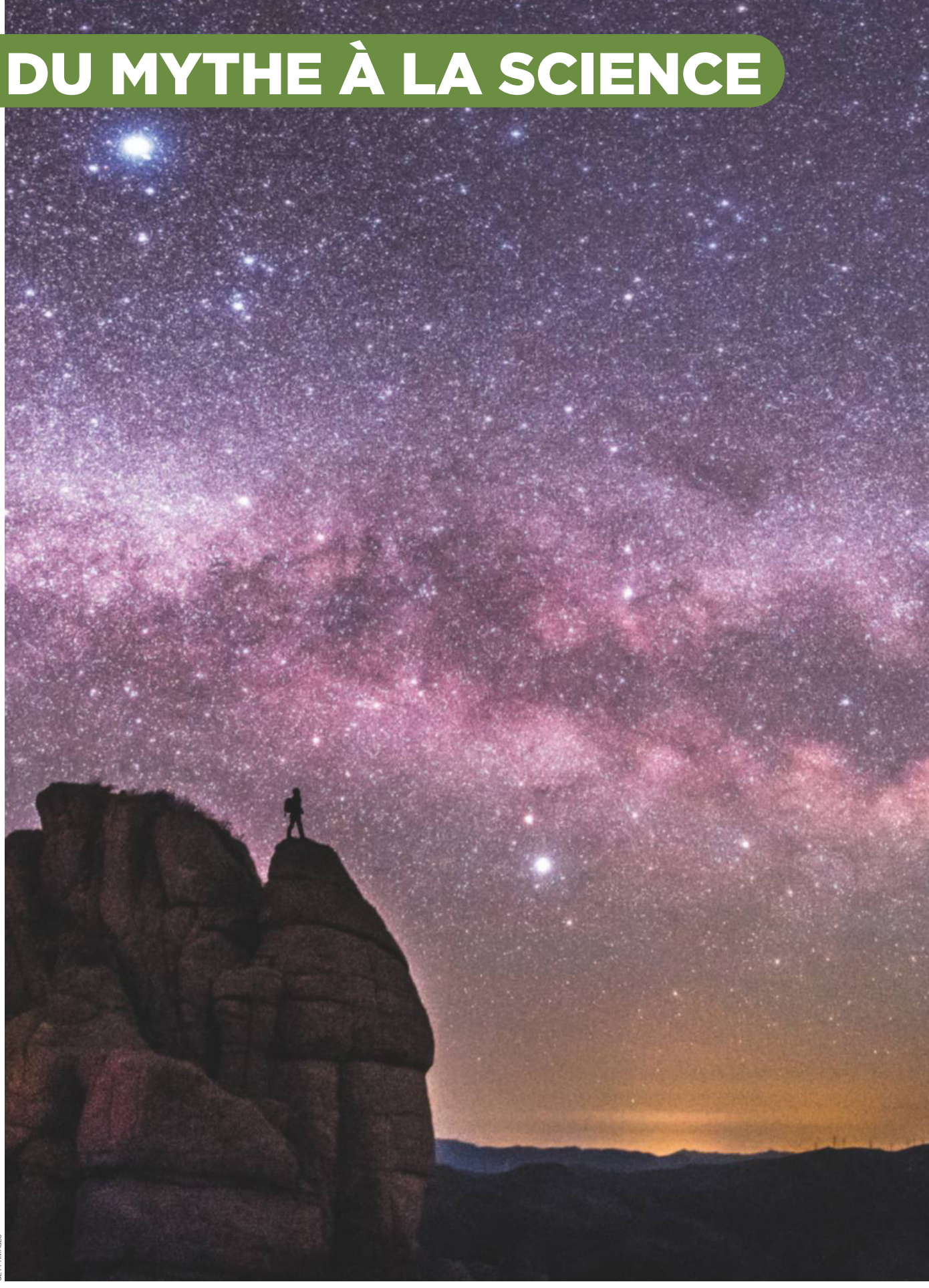
Il n'y a pas de raison qu'on vive dans un Univers spécial, que ce soit très différent au-delà de ce que l'on voit. Certains donnent libre cours à leur imagination, et leurs scénarios relèvent de la science-fiction. On ne sait pas même si l'Univers est fini ou infini…

À propos de science-fiction, il y a l'éternelle question de la vie ailleurs que sur notre planète…

À mes yeux, ce n'est pas de la science-fiction ! Le fait que la vie ait émergé sur Terre nous paraît spectaculaire… Mais que d'autres formes de vie, différentes de celles que nous connaissons ici, soient apparues dans le Système solaire, par exemple dans les océans situés sous la croûte de glace de Titan ou d'Encelade, me semble plus que probable. Et notre système solaire n'est pas unique. Alors, certes, s'il y a des civilisations partout, pourquoi n'en avons-nous pas encore vues ? Une civilisation n'est-elle qu'une petite seconde dans l'histoire de l'Univers – toutes n'apparaissent pas au même moment, raison pour laquelle on ne peut ni les voir ni échanger ? Ou sommes-nous une espèce protégée, maintenue dans une réserve naturelle par des entités supérieures et lointaines ? Tout est possible ! Nous avons marqué fortement notre planète, il est donc probable que d'autres systèmes de vie, volontairement ou non, marquent également leur environnement et soient ainsi détectables par leur impact sur leur atmosphère. La vie ne passe pas inaperçue !

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA
PHOTOS : JOSH EDELSON/AFP POUR SCIENCES ET AVENIR

DU MYTHE À LA SCIENCE



GETTY IMAGES

Plonger son regard dans la profondeur du ciel pour tenter d'en déchiffrer les mystères, y lire des présages, comprendre le monde. Voilà des millénaires que l'être humain, depuis sa planète, s'échine à saisir les lois de la mécanique céleste. D'observations toujours plus fines en théories audacieuses, les cosmologistes ont ainsi percé les secrets de la Voie lactée, de la lumière ou de la gravitation. Parfois même sans y croire !

Imaginez-vous sous un ciel étoilé, sans connaissance astronomique. Quels sont ces astres, comment tournent-ils ? Telles sont les énigmes qu'ont résolues les savants… avant de comprendre que le cosmos était bien plus vaste que ce qu'ils en voyaient.

Et l'Univers s'élargit jusqu'à l'infini

Observer le ciel pour mieux comprendre le monde : une préoccupation qui daterait en France d'au moins trente-quatre millénaires ! Un os retrouvé dans l'abri Blanchard, en Dordogne, et datant de cette période, porte une série d'encoches qui indiqueraient le cycle de la Lune. Mais dans quel but, nuit après nuit, relever ces informations ? Selon l'astrophysicien au CEA Jean-Marc Bonnet-Bidaud, *« la justification fondamentale de l'astronomie, dans toutes les cultures, est la mesure du temps »*. Grâce aux calendriers lunaires, les hommes préhistoriques se repéraient dans le continuum des saisons et suivaient les rythmes du gibier. *« Ce besoin de mesurer le temps est devenu fondamental dès la transition du néolithique, avec l'adoption d'une agriculture. Prévoir les saisons était primordial. Rater une récolte, c'était se mettre en danger de mort par famine »*, poursuit Jean-Marc Bonnet-Bidaud. C'est ainsi que les hommes ont identifié les cycles du Soleil et de la Lune et noté les configurations des astres, des repères bien plus fiables que l'évolution des températures.

Si l'observation du ciel était une pratique répandue, le développement d'une science astronomique n'a pas connu partout la même fortune. L'historien des sciences Denis Savoie souligne l'écart entre Égyptiens et Babyloniens : *« Les Égyptiens sont restés isolés dans la vallée du Nil pendant près de 3 000 ans. Hormis pour le Soleil, primordial pour établir leur calendrier dérivant de 365 jours, on ne trouve pas dans leurs textes de mention d'éclipses, et les astres n'avaient pas pour eux de caractère prédictif. »* Dans d'autres civilisations, à côté des considérations agricoles, l'astrologie devait constituer un moteur essentiel des travaux astronomiques. À Babylone, le destin du royaume était lié aux planètes. Les présages planétaires annonçaient au roi ou à la nation des affaires d'importance.

THE GRANGER COLL. NY / AURIMAGES

Hipparque, au IIe siècle avant notre ère, étudia les mouvements du Soleil et de la Lune.

En Grèce, la trigonométrie sphérique ouvre la voie aux calculs prédictifs

En Mésopotamie, l'essor de l'astronomie s'explique aussi par la présence d'un gouvernement centralisé et pérenne. Dans le temple d'Esagila consacré à Marduk à Babylone, des scribes scrutaient le ciel, nuit après nuit. La tâche était ardue, explique Denis Savoie : *« Dans le ciel nocturne, vous avez des astres fixes, les étoiles ; devant elles, des astres qui bougent, les planètes. Et il faut imaginer avec ça comment est le monde ! »* Les Babyloniens comprirent que sur de longues durées, les mouvements célestes se répètent. Le grand cycle de Vénus est de huit ans, celui de Mars de quinze ans, celui de Jupiter de quatre-vingt-trois ans. Denis Savoie précise qu'ils *« cherchèrent à donner aux positions des astres un caractère prédictif, mais à des moments particuliers de la visibilité des planètes : leurs stations, disparitions et rétrogradations »*. Pour identifier ces moments, ils ordonnèrent le ciel en constella-

DOMINGIE & RABATTI/LA COLLECTION

Ce bas-relief mésopotamien, provenant de Sippar (Irak), illustre l'importance du Soleil neuf siècles avant notre ère. Il représente le roi Nabû-apla-iddina présenté au dieu-soleil Shamash. Sous le baldaquin, trois astres mentionnés dans le texte et assimilés à des divinités : le disque lunaire Sîn, le disque solaire Shamash et l'étoile du matin, la planète Vénus, identifiée à la déesse Ishtar.

tions, notamment sur le plan de l'écliptique, imaginant, après 900 av. J.-C., un zodiaque qui en comportait douze.

En Grèce, le développement de la trigonométrie sphérique et l'apport de connaissances babyloniennes insufflèrent à l'astronomie d'importants progrès au IIe siècle av. J.-C. Hipparque (190-120 av. J.-C.) transforma ainsi l'astronomie en un puissant outil de calcul et de prédiction : il calcula la distance Terre-Lune à 10 % près ! Mais c'est Ptolémée (v. 100-175), à Alexandrie, qui porta l'astronomie grecque à son apogée. Son œuvre, *L'Almageste,* dominera l'enseignement de la discipline jusqu'au XVIe siècle. Et pour cause ! Son système géocentrique, le Soleil tournant autour de la Terre, était un chef-d'œuvre mathématique. *« Il était capable de prévoir si l'éclipse de Soleil à venir serait partielle ou totale. Incroyable ! »*, s'exclame Denis Savoie. C'est aussi en Grèce que s'instaurera une astronomie personnelle, tradition qui perdurera des siècles : *« L'une des finalités essentielles de l'astronomie sera la production d'horoscopes, et cela jusqu'au XVIe siècle »*, rappelle l'astronome.

JULIETTE AGNEL

« UNE FINALITÉ ESSENTIELLE DE L'ASTRONOMIE SERA LA PRODUCTION D'HOROSCOPES, ET CELA JUSQU'AU XVIE SIÈCLE »

Denis Savoie, historien des sciences

Le soir du 11 novembre 1572, la voûte céleste changea…

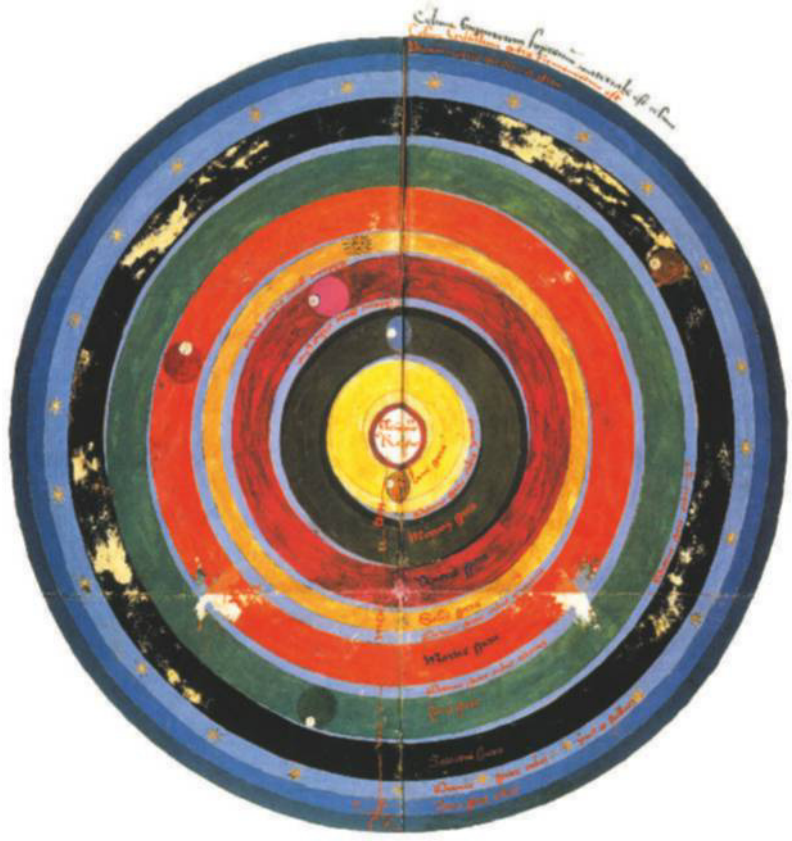
Après Ptolémée, en Occident, les connaissances stagnent, voire déclinent. *L'Almageste* est oublié, l'observation du ciel reléguée au second plan. *« Pourquoi observer le ciel incorruptible puisqu'il ne s'y passe rien ? »*, sourit Denis Savoie. Il faudra attendre le XIIe siècle et les traductions arabo-latines des textes pour que l'astronomie renaisse dans l'Occident latin.

Le renversement du géocentrisme s'opérera au XVIe siècle grâce à Copernic (1473-1543), ◆◆◆

◆◆◆ dont les travaux furent publiés en 1543 dans son *De Revolutionibus*. Son héliocentrisme, attaché au mouvement circulaire uniforme, n'était guère plus exact que le modèle ptoléméen. Mais ayant lancé la Terre en orbite autour du Soleil, convaincu d'avoir découvert le vrai système du monde, Copernic ouvrit la voie à une nouvelle conception de l'Univers.

Au tournant des XVIe et XVIIe siècles, l'astronomie connut deux bouleversements. Le premier fut céleste, avec l'observation coup sur coup d'une comète et de deux supernovae ; l'autre technique, avec les débuts de l'astronomie optique. Le soir du 11 novembre 1572, l'astronome danois Tycho Brahe remarqua une nouvelle étoile plus brillante que Vénus : une supernova. La voûte céleste était en train de changer ! Observateur acharné, Brahe dirigeait l'observatoire d'Uraniborg d'où, à partir du 13 novembre 1577, il suivit la trajectoire d'une comète, démontrant qu'il ne s'agissait pas d'un phénomène sublunaire. Quelques décennies plus tard, l'Allemand Johannes Kepler documentait une deuxième supernova en 1604, avant de déterminer en 1609 que les trajectoires des planètes sont des ellipses.

Cette même année 1609 voyait l'Italien Galileo Galilei braquer vers le ciel une lunette, instrument inventé l'année précédente par le Néerlandais Hans Lipperhey. Galilée visa d'abord la Lune et ses reliefs, puis Jupiter, dont il découvrit les quatre satellites, avant d'observer aussi les phases de Vénus, prouvant sa révolution autour du Soleil à la surface duquel il décrivit des taches. Quittant le Système solaire, il discerna une myriade d'étoiles dans la Voie lactée, là où Aristote ne voyait qu'un phénomène atmosphérique. Les astres prenaient enfin corps…



THE GRANGER COLLECTION / AURIMAGES

Ce dessin de Johann Tolhopf, astronome allemand du XVe siècle, montre qu'il voyait encore la Terre au centre du monde.

Mais les planètes, comment tournent-elles ? Il fallut pour le comprendre attendre Newton, qui introduisit dans ses *Principia* (1687) la force de gravitation universelle et évinça le divin du ciel. *« Au XVIIe siècle, des astronomes comme Giovanni Battista Riccioli pensent encore que les moteurs des planètes sont des anges ! »*, rappelle Denis Savoie. L'association de cette loi d'attraction au mouvement elliptique de Kepler permit de nombreuses découvertes, rapporte Jean-Marc Bonnet-Bidaud : « *Celle de Neptune par Le Verrier en 1846, à partir des anomalies de l'orbite d'Uranus, celle du compagnon invisible de Sirius (la naine blanche Sirius-B) à partir des perturbations de Sirius-A, ou l'orbite des comètes et l'explication de leur retour périodique.* »

James Evans, *Histoire et pratique de l'astronomie ancienne,* Les Belles Lettres, 2016

Plonger dans l'espace profond et remonter le temps

Pour Denis Savoie, *« l'Univers est resté banlieusard pendant longtemps »*. Le cosmos des Grecs était fini, cerclé par l'empyrée et ses feux éternels, et fixé par Ptolémée à 20 000 rayons terrestres. En changeant notre vision de la Terre, Copernic rejeta les étoiles beaucoup plus loin, mais en laissant aux philosophes le soin de déterminer *« que le monde soit fini ou infini »*. Le grand saut fut franchi par Ole Rømer en 1676, qui découvrit que la lumière avait une vitesse. Il comprit alors qu'observer loin, c'était aussi remonter dans le temps. William Herschel comparait ainsi l'astronome au botaniste regardant des arbres d'une même espèce à différents stades de croissance. Cette projection temporelle, associée à un modèle en expansion, donne accès à l'histoire même de notre Univers âgé de 13,8 milliards d'années. Mais vitesse finie de la lumière et expansion de l'espace imposent une limitation de l'Univers observable, désignée comme l'horizon cosmologique. D'un rayon d'environ 46 milliards d'années-lumière, celui-ci ne constituerait qu'une fraction de l'Univers. Mais il recèlerait quelque 2 000 milliards de galaxies, selon les images du champ profond collectées par le télescope Hubble.

Le cosmos, objet mathématique antique

Dépassant la simple répétition des cycles, les Babyloniens furent les premiers à mathématiser le ciel et à prévoir des phénomènes, à partir d'un nombre restreint de données. Pour Denis Savoie, c'est là que commença la science astronomique : *« La science, c'est quand il y a un caractère prédictif et mathématique. Cela apparaît avec les Babyloniens au v^e siècle av. J.-C. »* Il s'agit d'une modélisation arithmétique : *« Des fonctions arithmétiques croissantes et décroissantes, appelées zigzags, prédisent des moments remarquables dans le mouvement des planètes. »*

À la même époque, les Grecs, eux, imaginaient l'application de modèles géométriques au cosmos. Selon Jean-Marc Bonnet-Bidaud, *« la Grèce antique a produit une vision idéalisée du cosmos, basée sur le présupposé que les mouvements célestes suivent des sphères parfaites. Planètes, Soleil et Lune étaient portés par des sphères concentriques, tous les autres astres occupant la dernière sphère des Fixes ».* Mais certaines planètes étaient récalcitrantes ! Eudoxe de Cnide (408-355 av. J.-C.) conçut un modèle de 27 sphères homocentriques. Vite abandonné, il servit de base aux théories ultérieures, notamment à celle d'Apollonios de Perge (200 av. J.-C.). Celui-ci expliquait la rotation des planètes par leur positionnement sur un cercle épicycle tournant lui-même sur un cercle déférent, centré sur la Terre.

C'est aussi Newton qui construisit le premier télescope, doté d'un miroir concave. Ces instruments transportèrent les astronomes dans le ciel profond, et les catalogues célestes s'enrichirent de milliers d'étoiles et de comètes, mais aussi de nébuleuses, ces objets célestes flous. Le Britannique William Herschel – qui découvrit Uranus en 1781 – en répertoria 2 500. S'agissait-il de gaz diffus ou de collections d'étoiles lointaines ? « *Les grands télescopes du début du xx^e siècle allaient permettre d'établir la différence. La mesure de la distance des nébuleuses permit de conclure que certaines étaient extragalactiques* », explique Jean-Marc Bonnet-Bidaud.

Cette conclusion fut apportée dans les années 1920 par Edwin Hubble qui, grâce au télescope Hooker du Mont-Wilson (Californie), observa des céphéides, ces étoiles dont l'éclat varie périodiquement, dans plusieurs nébuleuses dont Andromède. L'Américaine Henrietta Leavitt avait établi que la période de variation de l'éclat de ces étoiles est liée à leur luminosité absolue. En la comparant à leur luminosité apparente, qui décroît selon le carré de la distance, on peut en déduire leur distance. Ces nébuleuses se situaient bien au-delà de la Voie lactée, et l'astronomie s'évadait vers des espaces incommensurables… En analysant le spectre des galaxies lointaines avec Vesto Slipher, Hubble établit aussi que l'Univers est en expansion. L'astronomie prospecta ensuite dans l'invisible avec les ondes radio, et permit en 1965 la découverte du fonds diffus cosmologique. Cette première image de l'Univers confirmait l'hypothèse du Big Bang, initialement théorisée par le chanoine belge Georges Lemaître.

Mais si les résultats astronomiques tranchent entre les modèles cosmologiques, ils soulèvent aussi des inconnues de taille. À commencer par la matière noire, suggérée dès 1933 par Fritz Zwicky. Quant à l'énergie noire, force gravitationnelle répulsive, elle a été postulée en 1998 pour expliquer l'accélération déconcertante de l'expansion de l'Univers depuis 6,5 milliards d'années, mesurée grâce aux magnitudes des supernovae. Les énigmes qu'elles posent, mais aussi les désaccords qui agitent le monde des cosmologistes *(lire l'interview p. 20)*, laissent augurer qu'il faudra peut-être repenser de fond en comble les modèles aujourd'hui établis. L'astronome, en sondant l'Univers, ne laisse aucun répit au physicien !

FRANÇOIS FOLLIET

WIKIPEDIA.CC

« MESURER LA DISTANCE DES NÉBULEUSES PERMIT DE CONCLURE QUE CERTAINES ÉTAIENT EXTRA-GALACTIQUES»

Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien au CEA

L'Univers insolite

Les femmes de l'ombre

Encore un domaine bien masculin, l'astronomie ! Mais parfois ingrat, l'observation du ciel, nuit après nuit, étant chose fastidieuse… D'où l'intérêt pour certains de solliciter leur sœur, femme ou fille ! Ainsi Sophie Brahe, sœur de Tycho, le seconda dans ses observations dès l'âge de 17 ans, en 1573, l'aidant notamment à poser les bases du calcul moderne de l'orbite des planètes. Deux siècles plus tard, la géniale calculatrice française Nicole-Reine Lepaute fit la connaissance de l'astronome Jérôme de Lalande puis du mathématicien Alexis Claude Clairaut, alors qu'elle aidait son mari à développer des horloges astronomiques. Elle contribua aux calculs monstrueux nécessaires à déterminer la date du retour de la comète de Halley, selon l'influence gravitationnelle de Saturne et de Jupiter. Clairaut oublia de la citer dans sa *Théorie des comètes* (1760)… Caroline Herschel, défigurée par le typhus et jugée non mariable par sa mère, assista son frère, William, astronome du roi George III d'Angleterre, qui découvrit Uranus en 1781. Puis, seule, elle découvrit 8 comètes, 3 nébuleuses et 500 nouvelles étoiles ! Impressionné, le roi lui accorda une pension annuelle, et lui remit la médaille d'or de la Royal Astronomical Society en 1828. La première scientifique professionnelle est une astronome !

FRANÇOIS FOLLIET

Le fluide censé emplir l'Univers a pris toutes les formes possibles au fil des siècles. Mais malgré l'imagination débordante des alchimistes et des scientifiques qui l'ont traqué, l'idée a fini par être abandonnée. Pour toujours ?

L'éther, substance à tout faire

On inventa des éthers pour faire nager les planètes, pour constituer des atmosphères électriques et des effluves magnétiques, pour transmettre des sensations d'une partie de notre corps à une autre, et ainsi de suite, jusqu'à ce que tout l'espace ait été rempli trois ou quatre fois d'éthers… Le seul éther qui a survécu est celui inventé par Huygens pour expliquer la propagation de la lumière. » C'est ainsi que James Maxwell, le père des ondes électromagnétiques, évoque, dans l'*Encyclopedia britannica* de 1878, cette substance mystérieuse, cette chimère qui obséda physiciens et ésotéristes pendant des siècles et qui, à ce moment-là, est toute proche d'être rejetée par la science.

C'est la lumière qui, bien avant l'avènement de l'astronomie multi-messagers (*lire p. 21-27*), a permis, peu à peu, de soulever le voile qui nous masque les invisibles de l'Univers. D'abord à l'œil nu, puis à partir de 1608 avec la lunette de l'opticien néerlandais Hans Lipperhey, améliorée dès 1609 par Galilée, avant qu'une incroyable épopée techno-scientifique ne conduise aux instruments du XXIe siècle. Mais comment expliquer que la lumière se propage ? Pendant des millénaires, il parut inconcevable que ce « quelque chose » puisse traverser l'espace sans support matériel. Ce milieu inconnu, les Anciens l'avaient baptisé éther.

Chez les Grecs, il emplissait le ciel des dieux du Panthéon. C'est *« la forme la plus pure d'air »*, écrira Platon, quelques années avant qu'Aristote ne le désigne comme cinquième élément, corps qui n'existe que dans la sphère céleste et complète les composantes plus concrètes de l'Univers : le feu, l'eau, l'air et la terre. Substance parfaite, immuable et éternelle, l'éther inspire les alchimistes occidentaux à partir

Marc Lachièze-Rey, *Les Avatars du vide*, Le Pommier/Universcience, 2019

Scott Walter, « L'éther » *in Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Dominique Lecourt (dir.), Presses universitaires de France, 1999
Article accessible sur : sciav.fr/scottwalter

CHARMET/SPL/SUCRE SALÉ

Au Moyen Âge, les alchimistes tentent par tous les moyens de tirer parti du fameux éther dont parlent les écrits grecs : le libérer leur permettrait, pensent-ils, de transformer le plomb en or. Manuscrit du XIVe siècle, bibliothèque de l'Arsenal, Paris.

du XIIe siècle, quand les textes grecs sont traduits en latin : cette essence « divine » ou quintessence serait enfermée en toute chose, estiment-ils. La libérer permettrait de transformer le plomb en or, métal parfait. Ils vont s'y employer corps et âme… en vain.

Avec René Descartes, au milieu du XVIIe siècle, l'éther quitte l'antre des alambiqueurs pour entrer dans le corpus scientifique. Le savant français soutient que le vide est empli d'un fluide aussi dense qu'invisible, contenant d'innombrables particules capables de transmettre des forces de collision en collision. Les tourbillons de ce fluide mettraient ainsi les astres en mouvement, tout comme ils agglomèreraient les corpuscules et engendreraient, par exemple, cailloux et planètes. *« Chez Descartes, il s'agit davantage d'une expérience de pensée, d'un modèle imagé, que d'une théorie étayée,* estime Scott Walter, professeur d'épistémologie à l'université de Nantes. *Les outils mathématiques d'alors ne permettent pas de produire un modèle adéquat de cet éther. »* D'ailleurs, nul n'y parviendra par la suite… ce qui n'empêchera pas d'en postuler l'existence. Ce sera notamment le cas d'Isaac Newton.

Le savant anglais a deux bonnes raisons de s'intéresser à l'éther : d'abord, il est lui-même alchimiste. Surtout, il étudie la force gravitationnelle. Après avoir réfuté les tourbillons de Descartes et établi sa théorie de la gravitation universelle, il se retrouve face à une contradiction : comment est-il possible que cette force agisse instantanément et à distance… alors qu'une interaction ne peut se faire à travers le vide ? Pour résoudre cette incohérence, il conçoit, dans la lignée des alchimistes, une *« espèce d'esprit très subtil qui pénètre à travers tous les corps solides »*, comme il l'écrit dans le livre III des *Principia*, en 1687. Sans prononcer le mot ni chercher à le théoriser, faute d'observations pour appuyer ses intuitions.

HAL

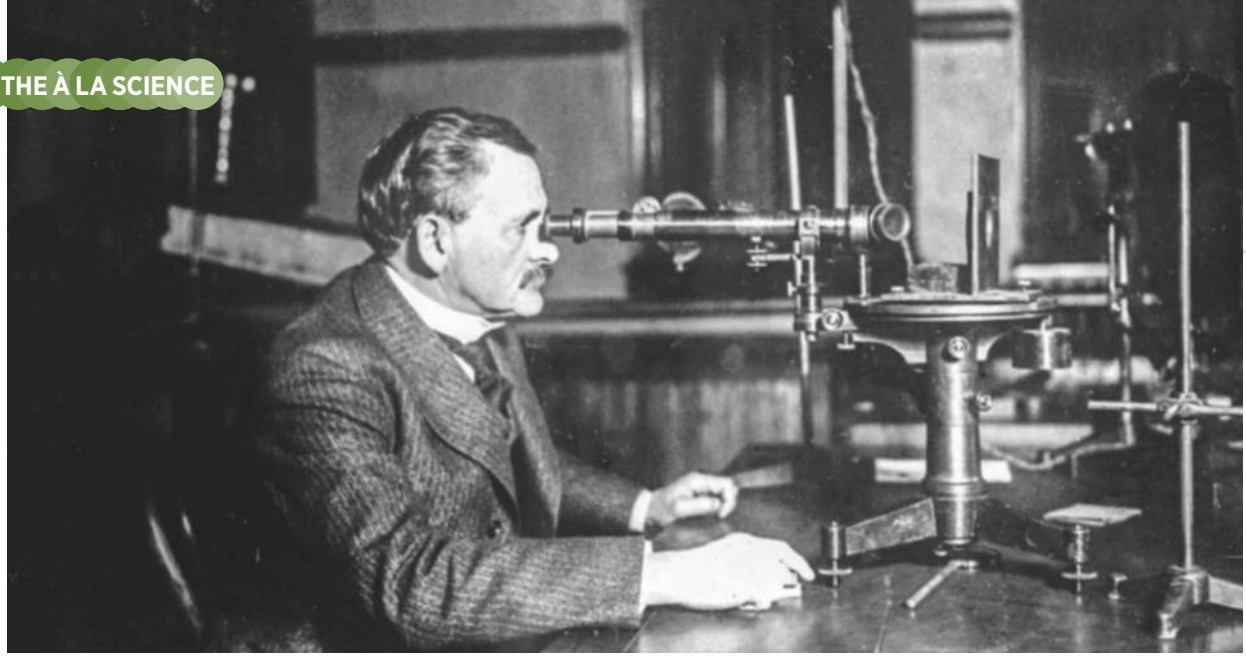
« CHEZ DESCARTES, IL S'AGIT DAVANTAGE D'UNE EXPÉRIENCE DE PENSÉE, D'UN MODÈLE IMAGÉ, QUE D'UNE THÉORIE ÉTAYÉE »

Scott Walter, professeur d'épistémologie à l'université de Nantes

Solide, élastique ou rigide, l'éther a failli survivre à Einstein

C'est à la même époque que, le premier, Christiaan Huygens convoque un éther pour expliquer la propagation de la lumière, phénomène qu'il considère comme une onde, une vibration. *« L'éther est le support des ondes »*, résume Yves Gingras, historien et sociologue des sciences à l'université du Québec à Montréal. Cette idée d'éther luminifère est pourtant rejetée par Newton, pour qui la lumière est constituée de corpuscules pouvant se déplacer dans le vide. Mais les travaux de l'Allemand Otto von Guericke, autour de 1650, vont renforcer la thèse ondulatoire de Huygens. Il multiplie les expériences de création de vide partiel dans des récipients fermés et constate que si le son ne se propage plus, la lumière, elle, y parvient. Il y aurait donc un éther luminifère. Reste à en découvrir la nature…

Cette théorie ondulatoire de la lumière connaît de grands succès à l'aube du XIXe siècle, notamment avec l'expérience (1801) du Britannique Thomas Young. En faisant passer un ◆◆◆



JACQUES BOYER/ROGER-VIOLLET

Albert Abraham Michelson (1852-1931) regardant au spectrographe. Le physicien américain a reçu le prix Nobel de physique en 1907 pour sa conception d'instruments d'optique.

Michelson-Morley : la preuve par la lumière

L'interféromètre créé par Michelson est astucieux : le faisceau d'une source de lumière est divisé en deux par une lame semi-transparente inclinée à 45°. Les deux rayons voyagent, sur des parcours de longueur quasi identiques, en formant un angle droit avant de rebondir sur un miroir et de revenir vers le centre de l'instrument, éclairant un écran. Comme dans l'expérience de Young, des franges d'interférences apparaissent. Pour Michelson et Morley, si l'un de ces trajets est parallèle au sens de déplacement de la Terre, la vitesse de la lumière devrait être différente de celle de l'autre, perpendiculaire. Les franges seraient donc déplacées. Si tel avait été le cas, cela aurait prouvé l'existence du vent d'éther… et donc de l'éther lui-même. Toujours utilisé aujourd'hui – il est au cœur des détecteurs d'ondes gravitationnelles –, l'instrument s'est révélé capable d'une extraordinaire précision de mesure de la vitesse de la lumière. Il a valu à Michelson le prix Nobel de physique, en 1907.

◆◆◆ faisceau de lumière à travers deux fines fentes percées dans une plaque opaque, il observe, sur un écran, une alternance de franges claires et sombres. C'est le fruit des interférences entre les vibrations passées par les deux ouvertures, qui s'additionnent ou s'annihilent. Il montre que les vibrations lumineuses sont « transversales », animées dans un sens perpendiculaire à la direction de propagation, comme la vibration de la corde d'un instrument de musique. En France, Augustin Fresnel en déduit que l'éther est un solide – la plupart des ondes transversales connues sont à l'époque associées à des solides –, mais un solide élastique, ce qui serait compatible avec l'hypothèse de l'éther cartésien, puisqu'une élasticité suffisante permettrait aux astres de s'y déplacer, montrera George Stokes à la toute fin du XIXe siècle. Pourtant, s'il est plastique, l'éther devrait, comme le son dans l'air, s'animer d'ondes longitudinales – qui le compriment et le dilatent dans la direction de propagation. *« Or, personne n'observait de telles ondes »*, rappelle Yves Gingras. La seule explication possible de leur inexistence était que l'éther soit très rigide.

Mais auparavant, en Grande-Bretagne, Michael Faraday avait suggéré que la force magnétique et l'induction électrique – l'apparition d'un courant dans un métal quand on déplace un aimant à proximité – sont des phénomènes ondulatoires. James Maxwell s'inspirera de l'expérience pour établir ses fameuses équations. Celles-ci prédisent que la lumière est une onde électromagnétique se propageant à vitesse constante dans le vide, et confirment les conclusions de Faraday. La découverte des ondes radio, en 1887, par Heinrich Hertz, qui démontre qu'elles peuvent se propager entre un émetteur et un récepteur sans lien entre eux, consacre les travaux de Maxwell. Requalifié d'« électromagnétique », l'éther de Huygens en réchappe… jusqu'à quand ?

Tandis que Hertz bricole ses sources radio, l'Américain Albert Michelson entreprend – enfin – de démontrer l'existence de l'éther : selon lui, puisque la Terre se déplace dans cette substance supposée plus ou moins fixe, elle doit

SHUTTERSTOCK

créer dans son sillage un « vent d'éther ». Dans ce cas, la vitesse de la lumière dans une direction parallèle à ce déplacement sera légèrement différente de celle mesurée perpendiculairement (*lire l'encadré ci-contre*). Avec Edward Morley, qui l'a rejoint en 1885, il multiplie les expériences dans le sous-sol de l'université Case Western de Cleveland (Ohio). En 1887, les deux compères doivent se rendre à l'évidence. La vitesse de la lumière ne dépend pas du déplacement terrestre ni de l'éther… il n'y aurait donc pas d'éther électromagnétique !

Le concept a pourtant la peau dure… « *Des expériences se poursuivront jusque dans les années 1920*, sourit Scott Walter. *Notamment parce que George Stokes considérait qu'au voisinage de la Terre, l'éther était entraîné dans le sillage de la planète, et donc que l'expérience de Michelson-Morley ne pourrait voir ce vent qu'en s'éloignant de la surface terrestre.* » L'astronome Dayton Miller emporte un interféromètre à 1 740 mètres d'altitude, au sommet d'un mont californien. De son côté, le Suisse Auguste Piccard s'aventure jusqu'à 4 500 mètres en ballon. Rien à faire !

Fervent défenseur de la substance éthérée, le physicien Hendrik Lorentz lui donne même un coup de jeune, en 1892. Le Néerlandais considère qu'un objet en mouvement se contracte dans la direction de son déplacement. Autrement dit, alors que les trajets de la lumière dans l'interféromètre sont en principe de même longueur, celui qui se fait parallèlement à la direction du déplacement terrestre serait en réalité plus court. Ce qui rend vaine toute mesure du vent d'éther. Les équations de la transformation de Lorentz, qui relient les coordonnées de l'espace et le temps, très vite revisitées par le Français Henri Poincaré, formeront le cœur du travail d'Albert Einstein.

Celui-ci décrit, en 1905, sa théorie de la relativité restreinte : les lois de la physique sont les mêmes pour tout observateur immobile (ou en mouvement rectiligne uniforme). Second postulat : la vitesse de la lumière est constante dans le vide. Une théorie dans laquelle il n'est nullement question d'éther ! En 1915, Einstein étend la relativité aux observateurs en mouvement accéléré, notamment par un champ de gravitation qui, lui non plus, ne requiert aucun éther. Pourtant, il réaffirme lors d'une conférence, en mai 1920, que « *un espace sans éther est inconcevable, car non seulement la propagation de la lumière y serait impossible, mais il n'y aurait même aucune possibilité d'existence d'étalons d'espace et de temps (règles et horloges), ni donc d'intervalles d'espace-temps au sens de la physique* ».

« *Einstein jouait sur les mots*, nuance Yves Gingras. *Ce qu'il dit, c'est que l'espace-temps est le nouvel éther. Mais, à la différence de Descartes, il n'en fait pas une substance.* » « *Contrairement à l'éther, concept resté vague, l'espace-temps a des propriétés très bien définies*, ajoute l'astrophysicien Marc Lachièze-Rey. *Alors qu'après l'expérience de Michelson-Morley, l'éther semblait à la fois mobile et immobile, l'espace-temps a effacé ces paradoxes : celui-ci n'est ni au repos, ni en mouvement, puisque c'est par rapport à lui qu'on définit le repos et le mouvement !* »

En aurait-on fini avec l'éther ? Rien n'est moins sûr, selon Yves Gingras : « *On n'utilise plus aujourd'hui ce concept, mais notre besoin de substance le fera sans doute renaître d'une façon ou d'une autre !* » Sous forme de matière noire ou d'énergie sombre ?

DENIS DELBECQ

OLIVIER ROLLER/DIVERGENCE

« EINSTEIN JOUAIT SUR LES MOTS. CE QU'IL DIT, C'EST QUE L'ESPACE-TEMPS EST LE NOUVEL ÉTHER… MAIS IL N'EN FAIT PAS UNE SUBSTANCE »

Yves Gingras, historien et sociologue des sciences à l'université du Québec à Montréal

L'Univers insolite

Ces étoiles visibles en plein jour

Avec une magnitude apparente (sa brillance vue depuis la Terre) de -26,7, le Soleil ne facilite pas les observations astronomiques diurnes ! On peut quand même voir Vénus, l'étoile du Berger, dont la magnitude s'élève jusqu'à -4,9. Puis, lorsque le Soleil descend en dessous de 10° sur l'horizon, l'œil humain commence à déceler des objets moins brillants, jusqu'à des magnitudes de -2,5. Un observateur avisé repérera Jupiter et Mars, ainsi que Sirius, de magnitude -1,47, la deuxième étoile la plus brillante du ciel. Mais des étoiles visibles en plein jour et à l'œil nu sont apparues à plusieurs moments de l'histoire. On en compte cinq depuis l'an mil. Ce spectacle extraordinaire résulte de supernovae, explosions qui marquent la fin de vie des étoiles massives en produisant parfois plus de lumière que les milliards d'étoiles de leur galaxie hôte. La supernova la plus puissante des temps historiques, d'une magnitude de -7,5, aussi lumineuse qu'un quartier de Lune, apparut autour du 1er mai 1006, et durant deux ans, dans la constellation du Loup. Elle fut la seule étoile, à part le Soleil, à avoir projeté des ombres sur Terre. Peu après, en juillet 1054, une étoile du Taureau se mit à briller jusqu'à la magnitude -6. Ce sont là quelques-unes des péripéties de la Galaxie ! **F. F.**

THOMAS LEPELTIER
Docteur en astrophysique, chercheur en histoire et philosophie des sciences

« Le modèle du Big Bang pourrait ne pas être bien établi »

La théorie canonique expliquant toute l'histoire de l'Univers serait-elle à revoir ? Les observations peinent à retrouver dans la réalité les phénomènes prévus sur le papier.

NADÈGE CLAIRET

Le modèle de la naissance de l'Univers, dit du Big Bang, connaît des « tensions », euphémisme pour parler de ses défauts. Quelles sont-elles ?
Avec l'astrophysicien Jean-Marc Bonnet-Bidaud, nous avons analysé une dizaine de ces tensions, terme préférable à celui de défaut puisque ce dernier sous-entend un problème intrinsèque. Or il est impossible de savoir, à l'heure actuelle, si les anomalies que rencontre le modèle du Big Bang ne sont que passagères ou si, au contraire, elles traduisent un problème fondamental. Cela va des énigmatiques matière noire et énergie noire – dont les astrophysiciens n'arrivent pas à déterminer la nature ni même à garantir l'existence et qui, comptant pour 95 % de l'énergie de l'Univers, ont forcément agi lors de la naissance de celui-ci – aux désaccords sur la valeur du taux d'expansion de l'espace *(lire aussi p. 61)*, en passant par la difficulté à expliquer le déséquilibre entre la matière et l'antimatière alors que le modèle du Big Bang en prévoit une création égale. Autant de problèmes qui pourraient inciter les cosmologistes à ne pas déclarer le modèle standard comme bien établi.

Vous considérez aussi l'inflation, cette phase d'expansion exponentielle qu'aurait connue l'espace environ 10^{-36} seconde après le Big Bang, comme une théorie sans fondement physique. Quel est le problème ?
Dans notre ouvrage, nous rapportons les débats houleux – peu connus du grand public – à son sujet entre les spécialistes, dont certains estiment qu'elle est très spéculative. Le problème est simple : alors que, dans le modèle standard du Big Bang, l'Univers a connu une phase d'expansion faramineuse à ses tout débuts, le mécanisme physique à l'origine de ce phénomène, que l'on appelle inflation, repose sur l'existence d'un champ – l'inflaton – dont l'existence est loin d'être avérée.

Les nouvelles théories de gravitation quantique ne la prédisent-elles pas ?
La théorie quantique à boucles parvient, certes, à mieux relier ce qu'elle appelle le Big Bounce, le grand rebond qui vient remplacer les notions d'infiniment dense et chaud du Big Bang, au processus inflationnaire. Mais cette théorie est loin d'être aboutie. On pourrait même dire que, par ses efforts pour mieux rendre compte de l'inflation, la théorie quantique à boucles montre bien que, sans nouvelle approche de la gravitation, elle n'est actuellement pas satisfaisante.

L'existence, ou non, de la matière noire et de l'énergie noire sonne-t-elle le glas de la théorie du Big Bang telle qu'on la décrit actuellement ?
C'est impossible à dire. Il se peut que, demain, on arrive à détecter cette matière noire et à comprendre d'où vient l'énergie noire. Dans ce cas, le modèle standard du Big Bang sera conforté. Mais comme cela fait environ cinquante ans que l'on cherche en vain la première et plus d'une vingtaine d'années que l'on bute sur la seconde, on est en droit de se demander si ces difficultés ne proviennent pas d'un problème fondamental avec ce modèle standard.

Par quoi faudrait-il le remplacer ?
L'histoire de la cosmologie est pleine de théories concurrentes. À ce jour, aucune d'entre elles n'a emporté l'adhésion de la majorité des cosmologistes. Mais si les tensions du modèle perdurent, il faudra peut-être revenir sur ces propositions ou en inventer d'autres. En effectuant ce travail, il se peut que notre vision du cosmos soit amenée à changer en profondeur.

PROPOS RECUEILLIS PAR JACQUES-OLIVIER BARUCH

Jean-Marc Bonnet Bidaud et Thomas Lepeltier, *Big Bang, histoire critique d'une idée*, **Folio, 2021**

Thomas Lepeltier, ***L'univers existe-t-il ?*** PUF, 2021

CAHIER REPÈRES

Comment voir l'invisible

Pages réalisées par Denis Delbecq
Infographies : Bruno Bourgeois

Décrypter les messages de la lumière 22

- Le spectre électromagnétique
- Les multiples facettes de la nébuleuse du Crabe
- Qu'est-ce qu'une onde ?
- Le décalage des fréquences ou *redshift*
- Spectres d'émission et d'absorption

Traquer les ondes électromagnétiques 24

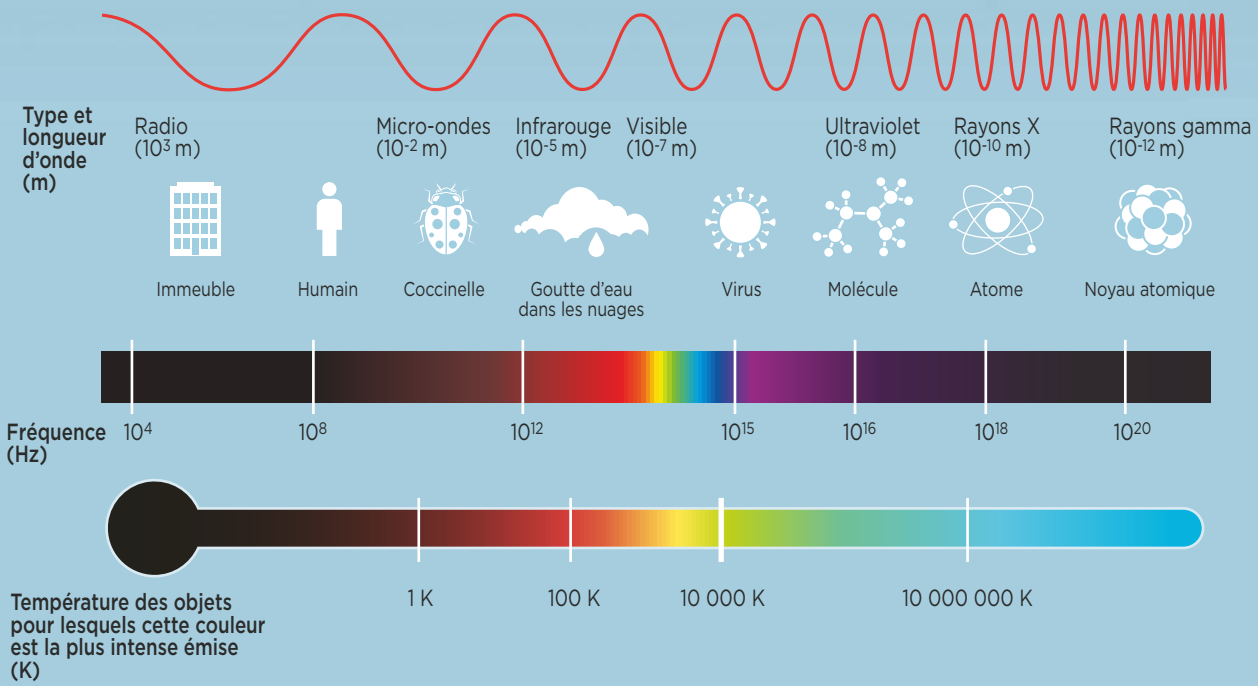
En quête de trois autres messagers du cosmos 26

SHUTTERSTOCK

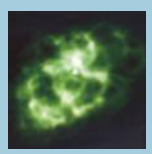
Décrypter les messages de la lumière

Depuis la nuit des temps, la lumière est notre principale source de renseignements sur l'Univers. Sa couleur nous indique la nature des phénomènes qui lui donnent naissance. À portée de main comme aux confins du cosmos.

Le spectre électromagnétique

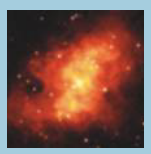


Les multiples facettes de la nébuleuse du Crabe



Radio

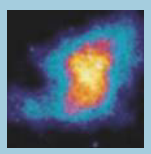
Le point brillant est une étoile à neutrons – ou pulsar – qui émet un signal radio environ 60 fois par seconde. Il s'agit des restes d'une supernova, une étoile qui a explosé en l'an 1054. Le halo radio qui l'entoure provient des électrons qui tournent en spirale.



Infrarouge

Visible

La nébuleuse présente un aspect différent suivant qu'on la regarde dans l'infrarouge (à gauche) ou dans le visible (à droite). Son étoile à neutrons produit un halo associé aux électrons, et des filaments qui marquent la présence des restes de l'enveloppe initiale de l'astre.



Ultraviolet

On perçoit au centre les électrons chauffés par l'étoile à neutrons et sur les bords ceux qui ont refroidi en s'éloignant.

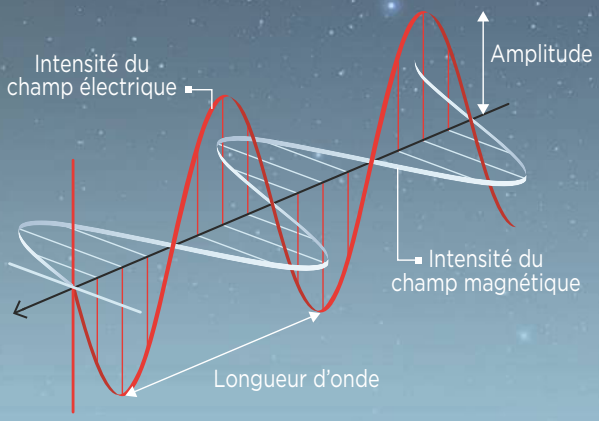
Rayons X

Le cœur de matière condensée autour de l'étoile à neutrons émet des rayons X sous forme de pulsations. Ils sont produits par les électrons les plus chauds.

Rayons gamma

En multipliant les prises de vue dans cette gamme d'ondes, on constate que l'étoile centrale tourne sur elle-même environ 30 fois par seconde : c'est un pulsar.

PHOTOS : NRAO/AUI, CHANDRA, ESA/HUBBLE, NASA/FERMI

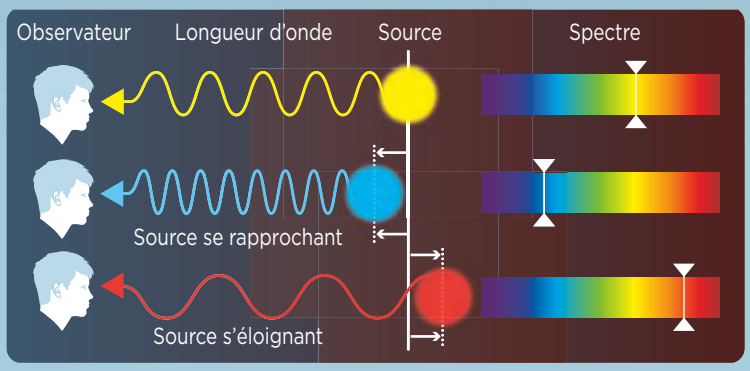


Qu'est-ce qu'une onde ?

La lumière – et toutes ses déclinaisons électromagnétiques – est un phénomène vibratoire. Elle est émise quand une particule chargée électriquement est accélérée. Contrairement aux ondes mécaniques, comme le son, qui ont besoin d'un support, l'onde électromagnétique peut voyager dans le vide, et ce toujours à la même vitesse de 299 792,5 km/s. Plus précisément, cette onde est formée de deux champs, électrique et magnétique, qui oscillent perpendiculairement entre eux, et perpendiculairement aussi à la direction de propagation (ici vers la droite). On la caractérise par une longueur – ou couleur, au sens large du terme –, qui est d'autant plus courte que la fréquence d'oscillation est élevée.

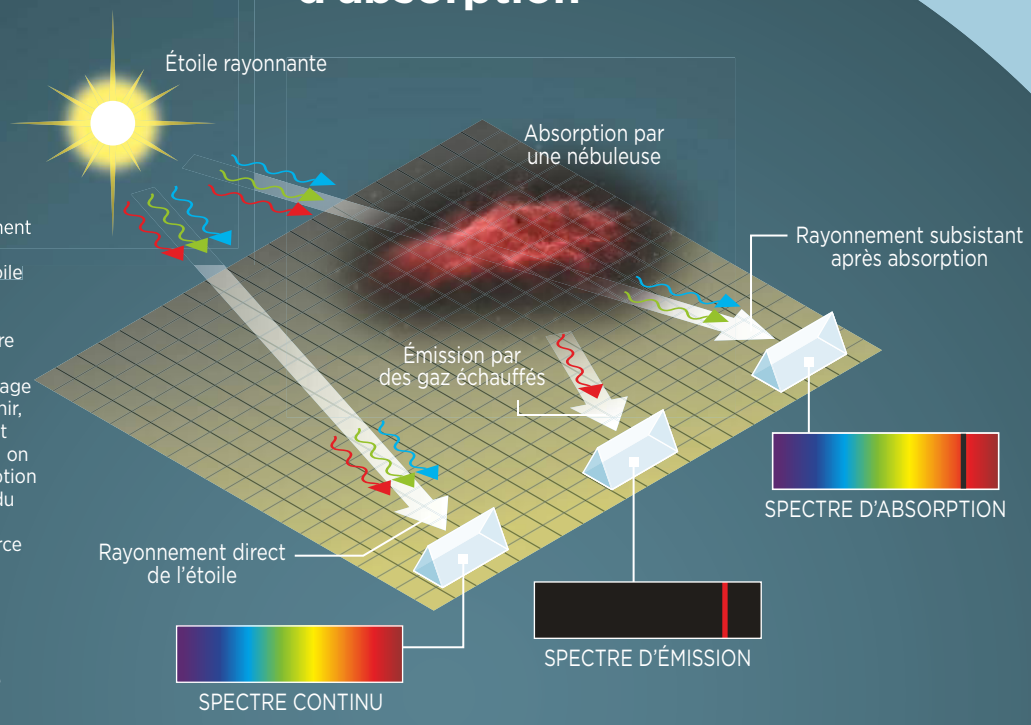
Le décalage des fréquences, ou *redshift*

Avez-vous remarqué que le son d'une sirène qui s'approche de vous est plus aigu que lorsqu'elle s'éloigne ? Un phénomène similaire se produit avec les sources lumineuses en mouvement. Quand une source s'approche de nous, la couleur de son spectre est décalée vers le bleu par rapport à ce qu'on percevrait si la source était fixe par rapport à nous. Et si elle s'éloigne, on la perçoit plus « rouge » qu'elle ne l'est en réalité. C'est ce qu'on appelle le décalage vers le rouge, *redshift* en anglais. Il est amplifié par l'expansion de l'Univers, qui dilate les longueurs. C'est la mesure de ce décalage qui nous renseigne sur la distance des galaxies lointaines.



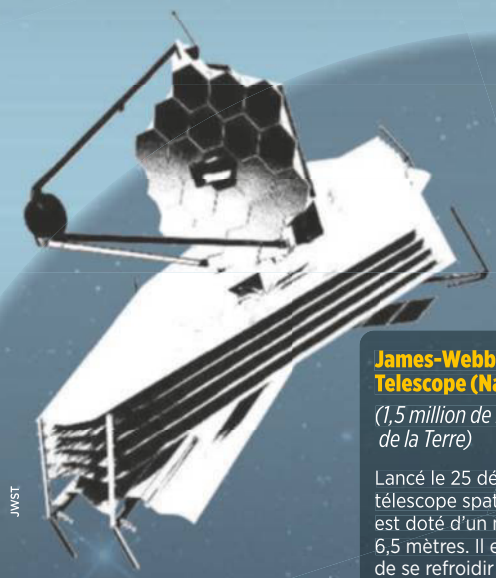
Spectres d'émission et d'absorption

Les objets célestes rayonnent en différentes longueurs d'onde. La lumière d'une étoile se décompose, à travers un prisme, en ces différentes longueurs d'onde : ce spectre est continu. En revanche, si cette lumière traverse un nuage de gaz avant de nous parvenir, les atomes de gaz absorbent certaines longueurs d'onde : on observe un spectre d'absorption qui renseigne sur la nature du gaz. De même, un nuage de gaz non éclairé par une source lumineuse située derrière lui émet certaines longueurs d'onde caractéristiques de sa composition et de sa température. On observe un spectre d'émission en forme de raies très spécifiques.



Traquer les ondes électromagnétiques

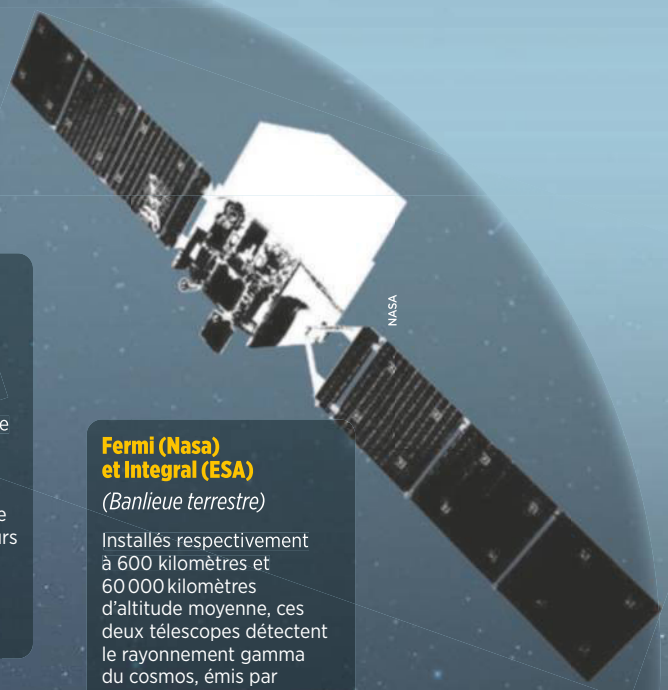
Les astrophysiciens s'appuient sur une armada d'instruments pour mesurer toute la gamme de fréquences des ondes électromagnétiques, des rayons gamma aux ondes radio. Beaucoup sont installés dans l'espace, ou dans des déserts d'altitude, pour éviter ou réduire les perturbations de l'atmosphère terrestre.


JWST

James-Webb Space Telescope (Nasa)

(1,5 million de kilomètres de la Terre)

Lancé le 25 décembre, ce télescope spatial infrarouge est doté d'un miroir de 6,5 mètres. Il est en train de se refroidir pour ne pas être brouillé par son propre rayonnement. Les ingénieurs de la Nasa procèdent aux réglages. Premières observations attendues cet été.


NASA

Fermi (Nasa) et Integral (ESA)

(Banlieue terrestre)

Installés respectivement à 600 kilomètres et 60 000 kilomètres d'altitude moyenne, ces deux télescopes détectent le rayonnement gamma du cosmos, émis par les événements les plus violents de l'Univers. Des observations impossibles depuis la surface terrestre.

SWIFT

Swift (Nasa)

(600 kilomètres)

Lancé en 2004 en orbite basse, ce télescope spatial comporte trois instruments pour étudier les rayonnements du visible à l'ultraviolet, les rayons X, ainsi que les rayons gamma de faible énergie. Il suit en moyenne 70 cibles différentes chaque jour.

ESA

DESI

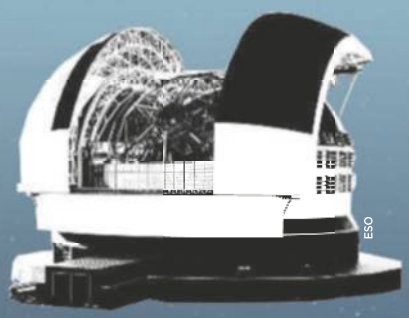
DESI, Dark Energy Spectroscopic Instrument
(États-Unis)

Installé sur un télescope de l'observatoire de Kitt Peak (Arizona), cet instrument doit aider à comprendre l'effet de l'énergie sombre sur l'expansion de l'Univers. Il a livré, en janvier, une esquisse de sa future carte 3D des galaxies, qui est déjà la plus précise jamais réalisée.

NENUFAR

NenuFAR
(France)

En cours d'achèvement à Nançay (Cher), ses 1824 antennes scruteront les signaux radio basse fréquence (10-85 MHz), qui peuvent notamment provenir d'exoplanètes, de l'aube cosmique et de pulsars. Le site est si sensible aux parasites (radars, émetteurs FM, relais de téléphonie…) qu'il est protégé par une zone réglementée de 3 kilomètres alentour.



ESO

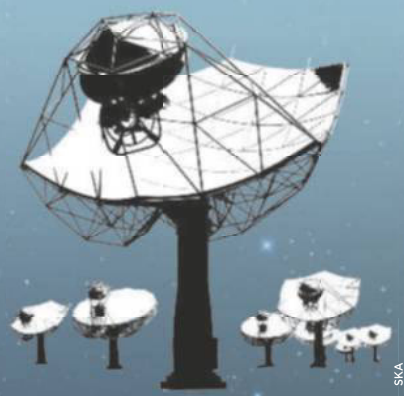
ELT, Extremely Large Telescope
(Chili)

C'est l'un des trois télescopes géants en construction dans le monde. Il doit être achevé en 2025 sous l'égide de l'Observatoire européen austral, à 3 060 mètres d'altitude dans les Andes chiliennes. Son miroir primaire de 39 mètres de diamètre scrutera, entre autres, le voisinage de trous noirs et les galaxies très lointaines.

WIKIPEDIA

Vera-Rubin Observatory
(Chili)

En construction au Chili, ce télescope américain utilisera un miroir primaire de 8,2 mètres de diamètre, à partir de l'automne 2023. Il doit photographier le ciel austral plus de 800 fois en dix ans, pour dresser un inventaire des objets célestes, et apporter des indices sur la matière noire et l'énergie sombre.



SKA

SKA, Square Kilometer Array
(Afrique du Sud, Australie)

Ce radiotélescope géant offrira une surface réceptrice de 1 kilomètre carré ! 200 paraboles sont installées en Afrique du Sud auxquelles s'ajouteront 130 000 antennes fixes dans l'Ouest australien. Plus d'autres installations, notamment le NenuFAR français.

En quête de trois autres messagers du cosmos

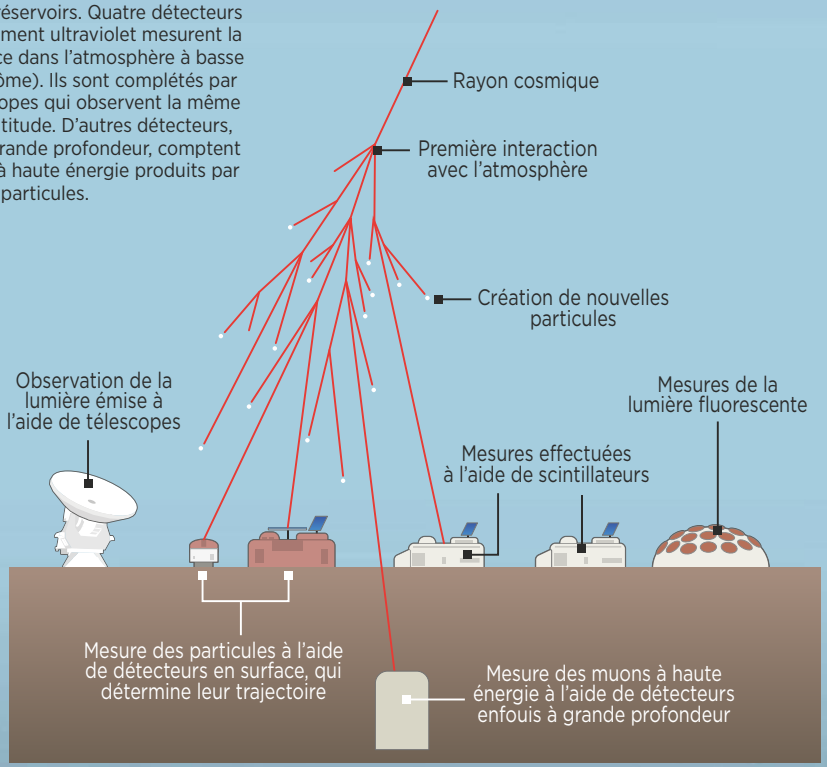
Pour détecter des événements cosmiques infimes ou rares, les scientifiques recherchent d'autres messagers que les sources électromagnétiques. Avec des instruments couvrant des surfaces ou des volumes gigantesques…

Détection des rayons cosmiques

Installé à l'ouest de l'Argentine, l'observatoire Pierre-Auger traque les particules à haute énergie venues du lointain cosmos. Ce sont le plus souvent des protons ou des noyaux lourds qui interagissent avec l'atmosphère à haute altitude, créant de nouvelles particules qui interagissent à leur tour, et ainsi de suite. Les 1600 scintillateurs mesurent la lumière émise quand des particules interagissent avec l'eau de leurs gros réservoirs. Quatre détecteurs de rayonnement ultraviolet mesurent la fluorescence dans l'atmosphère à basse altitude (dôme). Ils sont complétés par trois télescopes qui observent la même chose en altitude. D'autres détecteurs, enfouis à grande profondeur, comptent les muons à haute énergie produits par l'averse de particules.

CNRS

L'observatoire Pierre-Auger couvre 3 000 kilomètres carrés.



► 17 août 2017 : GW170817, le premier événement multimessager

La détection d'un signal d'ondes gravitationnelles dans l'interféromètre Ligo, suivi d'ondes gamma, ultraviolettes, visibles, infrarouges et radio a permis de déterminer qu'il s'agissait des derniers instants avant la fusion de deux étoiles à neutrons, qui a créé un trou noir. C'est à ce jour le seul événement multimessager jamais observé. Il a été étudié par 3 674 astronomes, notamment à partir des données de 70 observatoires. Seuls les neutrinos – non détectés – ont manqué pour que la fête soit complète.

12 h 41 min 04 s. UTC (T0)

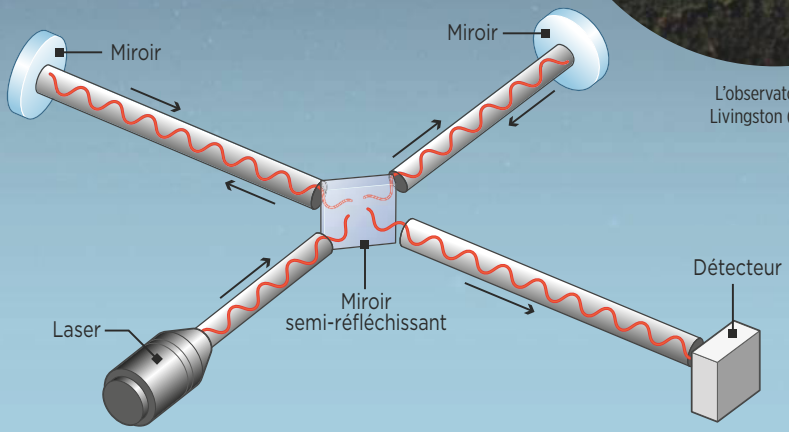
L'observatoire d'ondes gravitationnelles Virgo (Italie) capte un signal, suivi 22 millisecondes plus tard par son homologue Ligo de Linvingston (Louisiane), puis à T0 + 25 ms par l'autre Ligo (Hanford), au nord-ouest des États-Unis. L'information est diffusée à 13 h 08 min 16 s. UTC dans la communauté scientifique, une fois les signaux analysés, après la détection d'un sursaut gamma (ci-contre). L'événement va durer environ 100 secondes. Sa localisation approximative est déterminée vers 17 h 54, puis affinée dans la soirée.

T0 + 1,74 seconde

Le télescope spatial Fermi capte un bref sursaut d'ondes gamma. L'information est diffusée 14 secondes plus tard (donc avant celle concernant les ondes gravitationnelles). Une seconde observation, par le télescope spatial Integral, permet de mieux contraindre la position de l'événement.

Détection des ondes gravitationnelles

On observe depuis 2015 ces ondes grâce à des interféromètres de Michelson géants (Ligo aux États-Unis, Virgo en Italie), qui possèdent deux bras perpendiculaires et de même longueur (trois ou quatre kilomètres). Le faisceau d'un laser est divisé en deux par un miroir semi-réfléchissant. Chacun voyage dans un bras, retraverse le miroir semi-réfléchissant et atteint le détecteur. Un dispositif dans chaque bras (non représenté ici) a au préalable fait rebondir le faisceau de manière que le parcours réel dans chaque bras mesure 1200 kilomètres. Sur le détecteur, se forment des franges liées aux interférences entre les faisceaux sortant des deux bras. L'arrivée d'une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps : un bras devient plus court et l'autre s'allonge. Le signal du détecteur est modifié, ce qui permet de déterminer la source de l'onde gravitationnelle, voire de la localiser avec plusieurs observatoires.

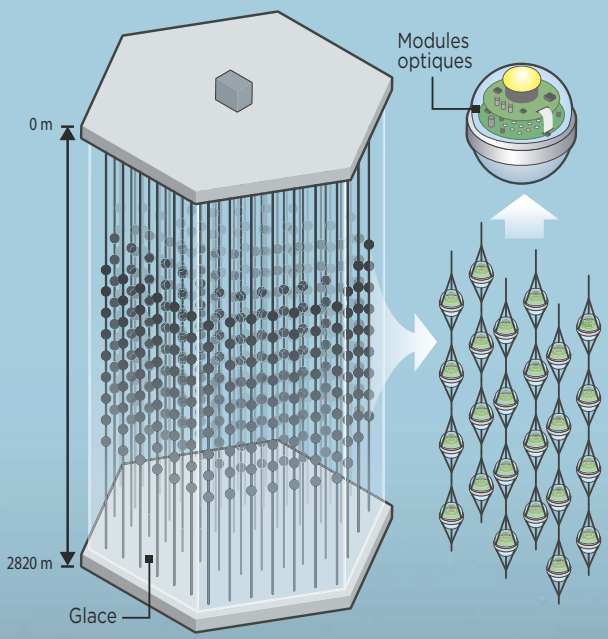


LIGO

L'observatoire Ligo de Livingston (Louisiane).

Détection des neutrinos

Comme ces particules interagissent extrêmement rarement avec la matière, il faut scruter des volumes considérables de matériau pour observer le résultat de ces interactions. Le détecteur le plus performant est aujourd'hui l'IceCube américain. Il comporte 86 lignes placées dans des puits. Chacune porte 60 modules optiques de détection, entre 1450 mètres et 2820 mètres de profondeur. L'ensemble surveille un kilomètre-cube de glace ! Quand un neutrino pénètre dans la glace et interagit avec elle, un rayonnement est capté par les modules proches. IceCube est accompagné, en surface, d'un réseau de détecteurs de rayonnements cosmiques. En Europe, un réseau similaire – KM3NeT – est en cours de déploiement en mer, à plus de 2000 mètres au fond de la Méditerranée, au large de la France et de l'Italie.



ICECUBE

Le bâtiment en surface du détecteur IceCube, en Antarctique.

T0 + 13 h 44

Pointé dans la direction de l'événement indiqué par Ligo/Virgo, le télescope Swope, installé au Chili, repère une émission de lumière bleue. En moins d'une heure, cinq autres équipes captent des signaux dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge, depuis le Chili, l'Argentine et la Californie, ainsi que depuis l'espace (Swift).

T0 + 48 h

La lumière bleue a progressivement disparu.

T0 + 9 jours

Un flash de rayons X est observé par le télescope spatial Chandra.

T0 + 10 jours

La lumière visible a progressivement évolué vers le rouge et l'infrarouge. Les signaux optiques vont perdurer jusqu'au 11 septembre.

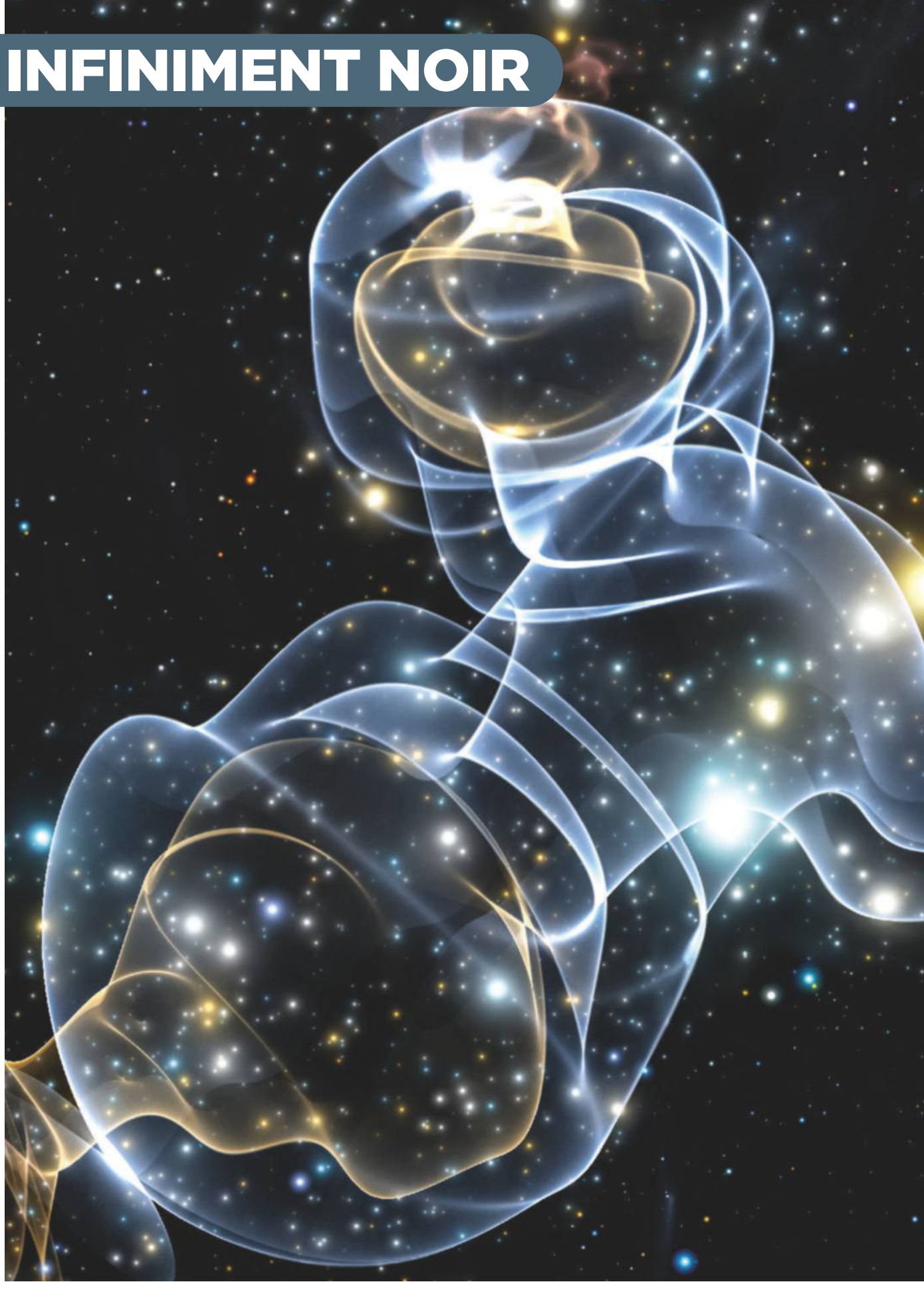
T0 + 15 jours

Le Very Large Array, radiotélescope installé au Nouveau-Mexique, capte à deux reprises les premières émissions radio associées à la localisation de l'événement. Une troisième détection est faite le 25 septembre.

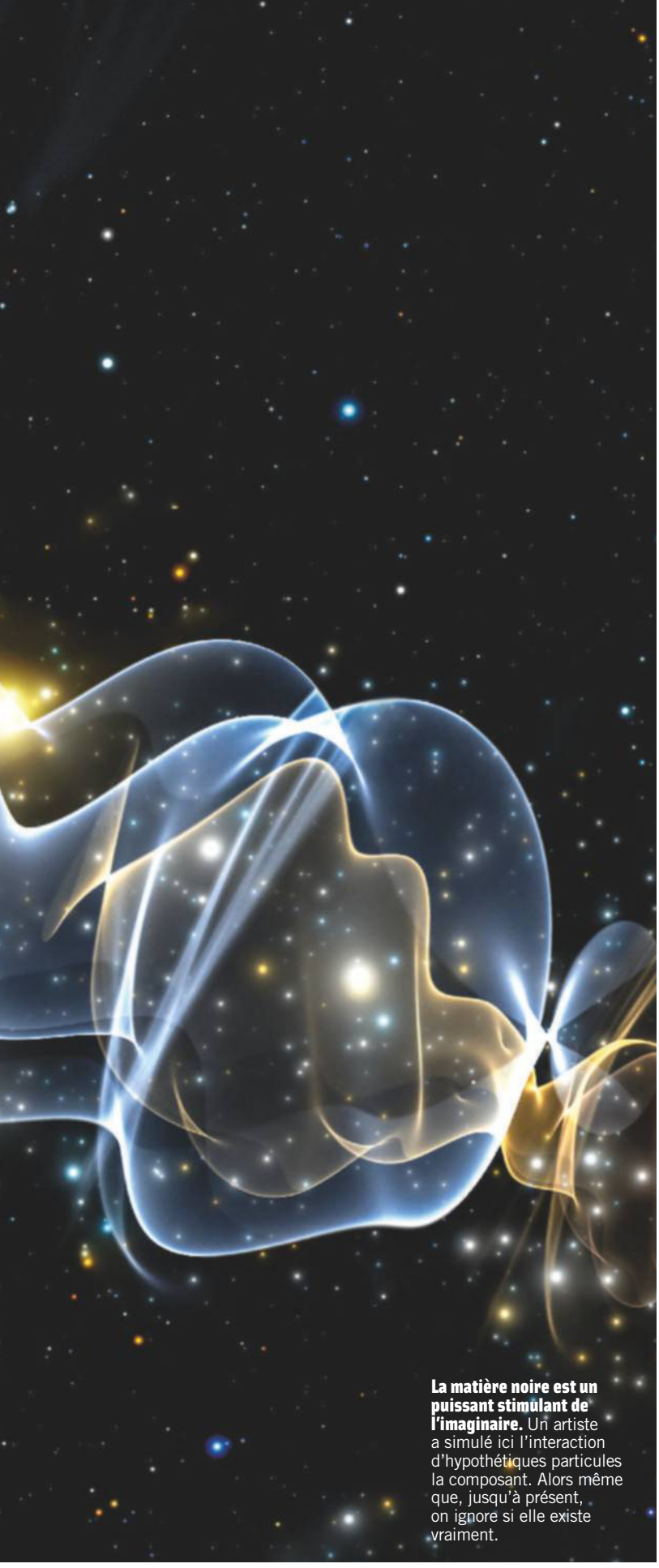
T0 + 16 jours

Un second flash de rayons X capté par Chandra montre que ce rayonnement n'avait pas encore cessé.

INFINIMENT NOIR



SHUTTERSTOCK



La matière noire est un puissant stimulant de l'imaginaire. Un artiste a simulé ici l'interaction d'hypothétiques particules la composant. Alors même que, jusqu'à présent, on ignore si elle existe vraiment.

L'Univers est sombre… très sombre ! Certains objets cosmiques défient la lumière, comme les trous noirs, qui l'avalent toute crue sans jamais la restituer. Mais le noir, c'est aussi la couleur que les physiciens affectent à ce qu'ils ne peuvent expliquer et recherchent ardemment : matière noire, énergie noire… Pour venir à bout des embarras que ces inconnues leur créent, les théories foisonnent.

Presque un siècle qu'on a postulé son existence, et plusieurs décennies qu'on repère ses effets. Et pourtant… la matière noire existe-t-elle vraiment ? Ou faut-il l'inscrire au catalogue des plus beaux mirages scientifiques ? Les astrophysiciens mettent au point les expériences de la dernière chance.

Matière noire : être ou ne pas être, éternelle question

ENRICO SACCHETTI/INFN

Pour tenter de débusquer la furtive matière noire, les physiciens doivent recourir à des équipements de plus en plus impressionnants. Ici, l'immense cuve de l'expérience Xenon, en Italie, qui tente de repérer des Wimps, particules qui pourraient la constituer.

En ce début des années 1930, l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky observe dans son télescope un ballet céleste. Celui de sept galaxies liées par la gravité dans la constellation de la Chevelure de Bérénice. Zwicky cherche à déterminer leur masse, et utilise pour cela deux méthodes : logiquement, elles devraient donner un résultat similaire… La première repose sur la mesure de la lumière émise par ces galaxies, la seconde sur la mesure de leurs vitesses les unes par rapport aux autres. Problème : les résultats ne concordent pas. La masse déduite des vitesses est beaucoup plus élevée – 400 fois plus ! – que celle déduite de la lumière. Certaines des galaxies sont si rapides que l'amas devrait se disloquer… sauf si, imagine Zwicky, une « matière noire » invisible maintient sa cohésion.

Zwicky a un caractère notoirement effroyable – il aurait traité ses collègues de *« crétins sphériques »*, car il les trouvait stupides sous tout point de vue. Est-ce pour cela que son hypothèse apparemment extravagante ne trouve pas crédit auprès de la communauté des astronomes ? Possible. Surtout, les instruments ne sont pas encore assez précis pour éliminer des erreurs de mesure. Quarante ans plus tard, lorsque l'Américaine Vera Rubin observera une trentaine d'autres galaxies, ses mesures seront bien moins incertaines. Et elle constatera une chose surprenante : les étoiles les plus éloignées du centre de leur galaxie tournent beaucoup plus vite que prévu, et devraient par conséquent en être éjectées… ce qui n'est pas le cas. Là encore, il semble qu'une matière invisible soit à l'œuvre… Débute alors une traque extraordinaire qui mobilise tous les instruments de la planète, les théories les plus originales, sans résultat tangible jusqu'à présent.

Si la matière noire reste invisible, elle ne peut pourtant s'empêcher de se trahir, en exerçant une influence gravitationnelle sur la matière ordinaire. *« On observe ses effets à plusieurs niveaux : dans les galaxies, les amas de galaxies et à l'échelle cosmologique,* souligne Francesca Calore, chercheuse au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTH). *Ce n'est qu'en combinant ces trois échelles qu'on peut en avoir une idée. »* Dans les galaxies, son effet est surtout visible à la périphérie, relativement pauvre en étoiles. Au centre, la force gravitationnelle exercée par les étoiles et la poussière domine. *« On n'observe pas sa présence à une échelle plus petite comme celle du Système solaire, où son action serait négligeable comparée par exemple à l'attraction entre planètes »*, précise Francesca Calore.

Le décalage des rayons lumineux trahit la présence d'une masse cachée

On peut la repérer également dans les amas de galaxies, dont elle conditionne les mouvements, comme l'avait remarqué Zwicky. Mais elle s'y révèle aussi à travers un phénomène prédit par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein : la lentille gravitationnelle. Tout corps massif, tel un amas de galaxies, dévie les rayons lumineux émis par un objet astronomique lointain et très brillant (galaxie, trou noir supermassif très lumineux ou quasar…) situé en arrière-plan. Et ce, d'autant plus que cet objet est massif. Or, la déviation apparaît beaucoup plus importante que celle attendue à partir de la seule matière visible de l'amas. Là encore, ce décalage trahit la présence d'une masse cachée.

Enfin et surtout, la matière noire apparaît à l'échelle cosmologique. Car nous possédons une « carte » du tout jeune Univers : celle que les observatoires spatiaux ont réalisée du fond diffus cosmologique (CMB), un rayonnement émis environ 370 000 ans seulement après le Big Bang. En 2013, le télescope spatial Planck, de l'Agence spatiale européenne, en a livré une version extraordinaire, montrant des fluctuations. Celles-ci ne peuvent être expliquées qu'en faisant appel à de la matière noire.

Par ailleurs, au fil du temps, la composition de l'Univers a pu être calculée et affinée, la ◆◆◆

F. CALORE

« ON OBSERVE LES EFFETS DE LA MATIÈRE NOIRE À PLUSIEURS NIVEAUX : DANS LES GALAXIES, LES AMAS DE GALAXIES ET À L'ÉCHELLE COSMOLOGIQUE. CE N'EST QU'EN COMBINANT CES TROIS ÉCHELLES QU'ON PEUT EN AVOIR UNE IDÉE »

Francesca Calore, chercheuse au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique

◆◆◆ proportion de matière noire déterminée : elle est estimée aujourd'hui à 26,8 %, contre 68,3 % d'énergie sombre *(lire p. 36)*… et à peine 4,9 % de matière ordinaire, celle dont les étoiles et nous-mêmes sommes faits.

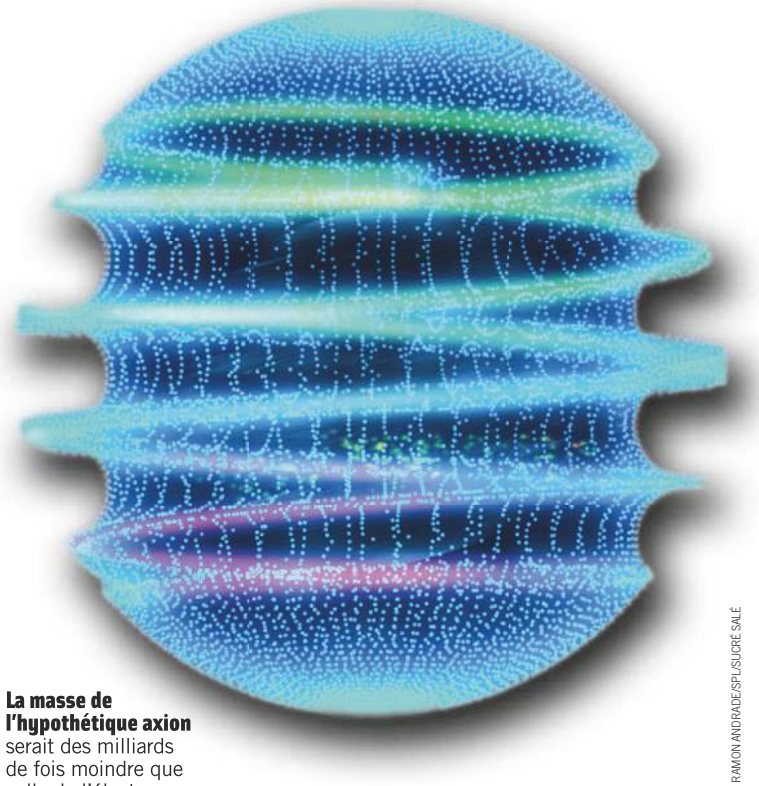
Mais quelles sont les principales propriétés de l'inconnue ? *« Elle est électriquement neutre, stable, et interagit très peu avec les autres particules du modèle standard* [qui décrit les constituants élémentaires de la matière et précise leurs interactions, *ndlr*] », explique Francesca Calore. Notamment avec les particules qui constituent notre matière ordinaire… C'est précisément ce qui rend sa traque difficile. D'autant que si l'on peut en observer les effets, sa nature demeure mystérieuse.

Si elle n'est pas découverte dans les dix ans, c'est… qu'elle n'existe pas

Une chose est sûre : *« Pour identifier ce qu'elle est, il faut se débarrasser du bruit cosmologique »,* souligne l'astrophysicienne. Autrement dit, des signaux parasites issus de multiples sources, dont certaines encore mal connues. En tenant compte de ces indésirables, Francesca Calore a conçu un modèle prédisant les caractéristiques de la matière noire grâce aux données du télescope spatial Fermi, qui observe le ciel vers le centre de notre galaxie. Dans cette région riche en énergie, des particules de matière noire pourraient entrer en collision et s'annihiler en produisant un rayonnement gamma détectable. Or, en 2010, les observations ont révélé un excès de rayonnement par rapport aux prévisions… *« Ce pouvait être la matière noire,* poursuit la chercheuse. *Mais nous avons creusé une autre hypothèse qui s'est révélée plus concluante : celle d'objets comme des pulsars* [étoiles à neutrons tournant rapidement sur elles-mêmes, *ndlr*]. »

Faute de parvenir à dire ce qu'est la matière noire, les astrophysiciens déterminent ce qu'elle n'est pas, en testant quantité d'hypothèses et en définissant toujours plus précisément quelles peuvent être sa masse et son énergie. Soit l'étau s'est suffisamment resserré, et la découverte se fera dans les dix prochaines années ; soit la matière noire… n'existe tout simplement pas, comme l'envisagent certains modèles. Ainsi, MOND, une théorie iconoclaste, s'en passe fort bien, à condition de… modifier les lois de la gravité, rien de moins !

JEAN-FRANÇOIS HAÏT



RAMON ANDRADE/SPL/SUCRE SALÉ

La masse de l'hypothétique axion serait des milliards de fois moindre que celle de l'électron.

Axions : les challengers mystérieux

Dans les années 1980, les physiciens théoriciens sont confrontés à un problème concernant l'interaction forte, qui maintient la cohésion des noyaux atomiques. Pour le résoudre, ils postulent l'existence d'une particule, baptisée axion. Au début des années 1980, Pierre Sikivie, chercheur à l'université de Floride, comprend que celui-ci pourrait être un bon candidat pour constituer la matière noire. Et imagine comment il serait possible de le détecter : en traversant un fort champ magnétique, il produirait un photon dans le domaine des ondes radio ou des microondes, qui pourrait être repéré. À condition de disposer de détecteurs ultrasensibles, dans un environnement refroidi au maximum… C'est le cas pour l'expérience ADMX (Axion Dark Matter Experiment) de l'université de Washington (États-Unis). *« Nous avons réalisé les premiers prototypes dans les années 1980-1990, mais nous n'avons atteint la sensibilité requise qu'en 2017,* souligne Leslie Rosenberg, responsable scientifique d'ADMX. *Elle est de l'ordre du yoctowatt* [le millionième de milliardième de milliardième de watt]. *J'ai téléphoné au Système international des unités à Paris, et on m'a confirmé qu'il n'y avait rien pour désigner quelque chose de plus petit que le préfixe yocto ! »* Depuis, ADMX teste toutes les hypothèses sur la masse de l'axion. *« Nous avons commencé à chercher les signaux attendus pour une masse de 2 microélectronvolts, et nous augmentons régulièrement cette masse, donc la fréquence du signal que nous devrions détecter. Le problème, c'est que l'électronique à mettre en œuvre devient de plus en plus complexe »,* souligne Leslie Rosenberg. Toujours rien en vue en quatre ans de traque…

L. ROSENBERG

« LE SYSTÈME INTERNATIONAL DES UNITÉS À PARIS M'A CONFIRMÉ QU'IL N'Y AVAIT RIEN QUI DÉSIGNE QUELQUE CHOSE DE PLUS PETIT QUE LE PRÉFIXE YOCTO ! »

Leslie Rosenberg, responsable scientifique d'ADMX

Wimps : des favoris contestés

« Nous sommes inquiets ! lance Luca Scotto Lavina, responsable scientifique du groupe Xenon au Laboratoire de physique des hautes énergies à Paris. *Si notre expérience n'aboutit à rien en 2030, le modèle des Wimps est mort. »* Sur le papier, pourtant, tout fonctionne merveilleusement bien. Développé dans la seconde moitié du XX^{e} siècle, le modèle standard s'est heurté à quelques écueils, notamment l'attribution d'une masse précise à chaque particule. Pour les résoudre, les physiciens ont imaginé la supersymétrie, une théorie qui dote chaque particule d'une jumelle. Et parmi ces jumelles, les « Wimps », acronyme de Weakly Interactive Massive Particles, traduit en français par « mauviettes » à cause de leur discrétion. Or, coup de chance : la densité de ces particules telle que prévue par le modèle standard colle avec celle de la matière noire observée ! C'est le « miracle des Wimps ».

Ne restait donc plus qu'à les trouver… *« Nous avons fait l'hypothèse qu'ils seraient directement détectables depuis la Terre »*, explique Luca Scotto Lavina. Ils interagiraient très faiblement avec la matière ordinaire. D'où, à partir des années 1990, la conception de volumineuses expériences, dont la plus spectaculaire est sans doute la collaboration internationale Xenon. Installée en Italie centrale, elle est bâtie autour d'une cuve de xénon – un gaz trois fois plus dense que l'eau, liquide à –100 °C. Si un Wimp y heurtait un atome de gaz, il en résulterait un flash lumineux et une émission d'électrons, détectables au sommet de la cuve. Mais de tels événements seraient théoriquement rares et il faut, pour pouvoir les détecter, une énorme quantité de xénon liquide placé dans la cuve. De 10 kg de gaz en 1990, l'expérience est passée à 100 kg puis 1 tonne, et aujourd'hui 10 tonnes, dont 3,5 utiles, le reste absorbant les éventuels parasites – radioactivité naturelle, électronique des détecteurs, etc. En 2030, le projet Darwin augmentera la quantité à 50 tonnes.

« Le Wimp se caractérise par sa masse et sa capacité d'interaction. Grâce aux précédentes expériences, nous avons éliminé beaucoup de valeurs possibles pour ces deux paramètres », souligne Luca Scotto Lavina. En 2020, la collaboration a annoncé que la version « 1 tonne » de l'expérience avait capté plus de signaux que prévu. *« La matière noire n'est pas exclue, mais bien d'autres phénomènes peuvent être en jeu »*, précise le chercheur : parasites ou particules issues par exemple du Soleil… *« La version "10 tonnes", dont nous dépouillons les données, pourrait nous aider à y voir plus clair. »* D'autres expériences, sur Terre et dans l'espace, n'ont pas eu davantage de succès. Pas de doute : les Wimps, s'ils existent, sont vraiment des mauviettes.

« NOUS SOMMES INQUIETS ! SI NOTRE EXPÉRIENCE N'ABOUTIT À RIEN EN 2030, LE MODÈLE DES WIMPS EST MORT »

Luca Scotto Lavina, responsable scientifique du groupe Xenon au Laboratoire de physique des hautes énergies à Paris

Gianfranco Bertone, *Le Mystère de la matière noire*, Dunod, 2014

La matière noire dans l'Univers, leçon inaugurale de Françoise Combes au Collège de France : sciav.fr/matierenoire

THE XENON EXPERIMENT

L'expérience Xenon comprend 248 photodétecteurs ultrasensibles, capables de détecter un flash lumineux d'un seul photon si un Wimp heurtait un atome de gaz.

L'Univers insolite

Galaxies sans étoiles

La Voie lactée ou Andromède, notre plus proche voisine, nous donnent à voir leurs cortèges d'étoiles évoluant en de majestueuses spirales. Mais les galaxies n'ont pas toutes un destin aussi lumineux. En 2012, une équipe internationale d'astronomes travaillant à l'aide du Very Large Telescope, au Chili, a mis en évidence l'existence de galaxies sombres, des protogalaxies dont l'évolution se serait arrêtée il y a environ 13 milliards d'années, 800 millions d'années seulement après le Big Bang. Bien que riches en gaz, ces embryons galactiques auraient été peu productifs en étoiles, restant de fait très obscurs. Comment repérer ces sombres structures ? Pour y parvenir, les astrophysiciens ont utilisé une lampe de poche bien à eux : les propriétés du rayonnement ultraviolet émis par les quasars, des trous noirs très lumineux propulsant d'intenses jets de gaz. Au contact d'atomes d'hydrogène, ce rayonnement produit une émission fluorescente baptisée raie Lyman-alpha. La présence de ces galaxies sombres, emplies d'hydrogène, est alors révélée, dans un rayon de quelques millions d'années-lumière autour des quasars. Leur étude constitue une avancée dans la compréhension des premières phases de la formation des galaxies. **F. F.**

MOND : et si la matière noire n'existait pas ?

Un univers sans matière noire est-il possible ? Oui, à condition de modifier les lois de la gravité ! C'est l'idée audacieuse soutenue par le physicien israélien Mordehai Milgrom, qui a présenté sa théorie MOND (Modified Newtonian Dynamics) en 1983.
« Selon les lois de Newton, l'accélération liée à la gravitation est inversement proportionnelle au carré de la distance (1/r²). MOND stipule que pour les très faibles accélérations, autrement dit vers la périphérie des galaxies, elle est inversement proportionnelle à la distance (1/r), explique Pierre-Antoine Oria, doctorant à l'Observatoire astronomique de Strasbourg. *À l'échelle des galaxies, cette théorie est en très bon accord avec les observations récentes. »* En témoignent les travaux publiés en 2021 par l'équipe de Stacy McGaugh, de l'université Case Western Reserve aux États-Unis (Ohio), qui a testé avec succès certaines prédictions de MOND sur plus de 150 galaxies.
Cependant, si l'on passe à l'échelle supérieure, celle des amas de galaxies, les choses se compliquent. *« MOND ne suffit pas pour expliquer les grandes différences entre les vitesses des galaxies. Il manque un facteur 2 ou 3 de masse »*, souligne Pierre-Antoine Oria. Une hypothèse serait que de la matière ordinaire y est bien présente, mais qu'elle s'est jusqu'à présent dérobée aux regards *(lire aussi ci-contre).* Enfin, dans les fluctuations de l'Univers primordial où l'action de la matière noire est visible, MOND ne fonctionne pas. Des travaux sont en cours sur l'extension de la théorie à cette échelle cosmologique.
« MOND conserve une place à part dans le milieu scientifique. Elle était autrefois mal considérée, remarque Pierre-Antoine Oria. D'autant qu'elle viole le « principe d'équivalence » établi notamment par Albert Einstein pour décrire la chute des masses dans un champ de gravité, et vérifié avec une très grande précision par l'expérience spatiale Microscope en 2016. « *Mais l'absence de détection de matière noire et les problèmes posés par le modèle standard de la physique font qu'on lui accorde aujourd'hui davantage de considération »,* conclut le jeune chercheur.

MURDO MACLEOD

Selon le physicien Stephen Hawking, des trous noirs se seraient formés dans les premiers âges de l'Univers. Pourraient-ils constituer la matière noire ?

Les trous noirs primordiaux, le pari de Hawking

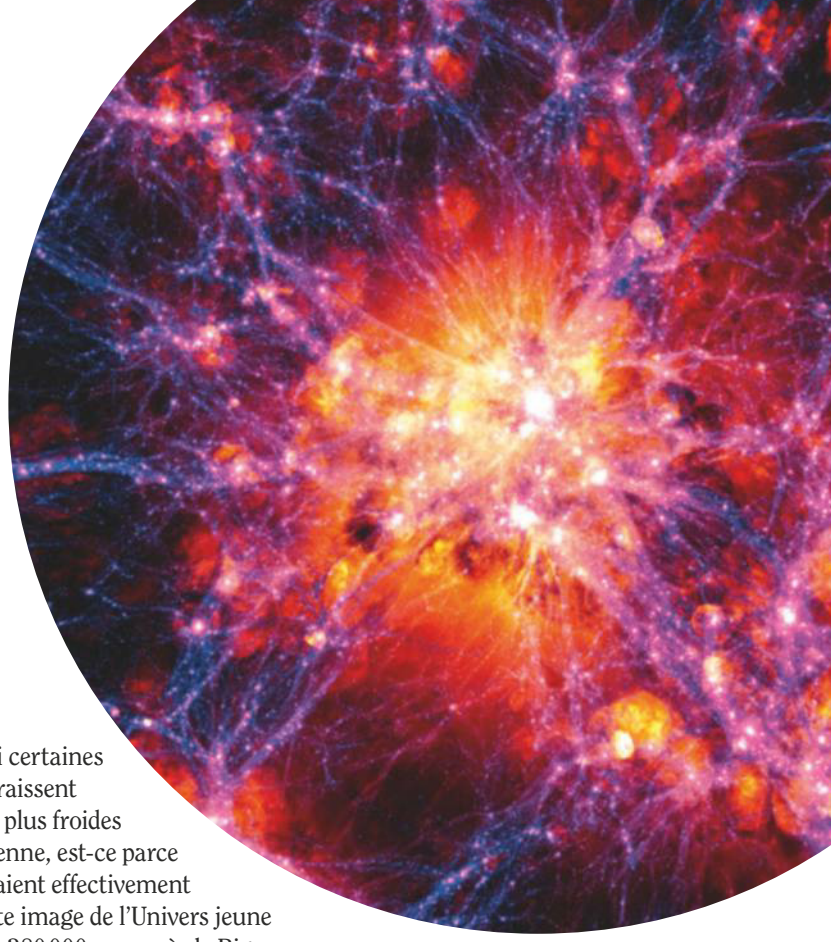
Et si la matière noire n'était pas constituée de particules individuelles, mais de trous noirs ? L'hypothèse taraude la communauté des cosmologistes depuis que les physiciens Stephen Hawking et ses collègues Bernard Carr et George Chaplin ont postulé dans les années 1970 l'existence de « trous noirs primordiaux », nés juste après le Big Bang et qui auraient modelé le tout jeune Univers. Les astronomes n'ont depuis eu de cesse de les traquer, tout comme d'autres objets sombres pouvant rendre compte de la matière noire. Entre 1990 et 2003, le programme français Eros (Expérience de recherche des objets sombres), installé au Chili, a cherché à découvrir les effets indirects de la présence de trous noirs de la taille d'une étoile mais aussi de naines brunes (petites étoiles froides et très peu lumineuses) dans les galaxies des Nuages de Magellan, sans résultat. Son homologue américain Machos (Massive Compact Halo Objects) n'a pas eu davantage de succès. Le domaine de recherche s'est étiolé… jusqu'à la formidable détection des ondes gravitationnelles en 2015. Des ondes notamment provoquées par la fusion de trous noirs. Pourrait-il s'agir de trous noirs primordiaux ? Il faudra accumuler beaucoup d'observations pour le dire.

Accélérateurs de particules : rien à l'horizon

La matière noire étant manifestement très rare dans notre environnement immédiat, pourquoi ne pas en fabriquer ? L'avènement des grands accélérateurs de particules a permis de l'envisager. Les collisions de protons à énergie très élevée donnent en effet naissance à de nouvelles particules, dont certaines pourraient présenter les caractéristiques attendues de la matière noire.
De nombreuses expériences sont menées notamment au sein du LHC, le grand accélérateur du Cern sous la frontière franco-suisse. Les scientifiques y testent quantité d'hypothèses, comme une matière noire constituée de Wimps *(lire p. 33)* ou couplée au célèbre boson de Higgs, découvert en 2012. Problème : la matière noire interagit peu avec la matière ordinaire, et ne peut donc probablement pas être détectée directement. La solution : faire la somme des énergies des particules issues d'une collision et la comparer avec l'énergie fournie au départ. S'il y a un déficit, c'est qu'il y a une matière cachée. Rien de tel n'a encore été observé… Parce que la puissance du LHC est insuffisante ? Les physiciens rêvent d'un collisionneur quatre fois plus grand, qui pourrait entrer en service après 2040.

On a retrouvé la matière manquante !

À la dérobée, de la matière ordinaire circule sur les autoroutes intergalactiques qui sillonnent l'ensemble du cosmos.



À très grande échelle, l'Univers a l'allure d'une toile, réseau d'amas de galaxies liés entre eux par des filaments, également composés de galaxies. La matière ordinaire qui y circule, très diluée, est peu visible.

«ILLUSTRIS COLLABORATION»/«ILLUSTRIS SIMULATION»

Au début des années 2000, les grands recensements de galaxies entrepris par les astronomes révélèrent un problème inattendu : on ne retrouvait pas, dans l'Univers contemporain, la quantité de matière ordinaire – composée de protons, neutrons et autres électrons –, qui aurait dû s'y trouver selon la théorie. Ce que les astrophysiciens nomment la matière baryonique (les électrons ne sont pas des baryons, mais comptent pour du beurre tant ils sont légers) et qui n'a aucun rapport – rappelons-le – avec la matière noire. Où étaient donc passés ces baryons manquants ?

Dès le début, les soupçons se tournèrent vers la « toile cosmique », ce réseau de nœuds et de filaments le long desquels s'agglutinent les galaxies et qui les relie entre elles. De grandes quantités de matière ordinaire pourraient y circuler de manière invisible à nos yeux si elles étaient assez diluées. En 2017, plusieurs équipes étudièrent, de façon indépendante, les fluctuations de température du fond de rayonnement cosmologique en se posant une même question : si certaines zones apparaissent légèrement plus froides que la moyenne, est-ce parce qu'elles l'étaient effectivement lorsque cette image de l'Univers jeune a été émise, 380 000 ans après le Big Bang ? Ou paraissent-elles refroidies simplement parce que leur lumière, avant de nous parvenir, a été diffusée par les électrons contenus dans des nuages de plasma situés à l'avant-plan ? En superposant la carte de la toile cosmique près de notre galaxie à celle du fond cosmologique, les astronomes constatèrent une certaine corrélation entre les zones froides du second et la répartition de matière de la première. Il semblait bien que de grandes quantités d'électrons étaient présentes le long de filaments reliant les galaxies. Et ils ont beau compter pour du beurre, s'il y a des électrons, c'est que des baryons ne sont pas loin ! Par un jeu d'ombres chinoises, une partie de la matière ordinaire manquante venait d'être découverte…

Une étude publiée l'année dernière par une équipe principalement espagnole a étendu la méthode à trois grands catalogues en 3D couvrant près de 90 % de l'histoire cosmique. Elle confirme qu'une grande partie de la matière baryonique se trouve sous une forme trop diluée et pas assez chaude pour être directement détectable par son rayonnement. De surcroît, elle démontre qu'une énorme quantité de matière se trouve dispersée dans les immenses espaces qui séparent les galaxies et les amas de galaxies. *« Le problème ne nous inquiète plus… C'était un peu comme estimer la population mondiale depuis la Station spatiale internationale en mesurant la luminosité des villes,* s'amuse Sandrine Codis, astrophysicienne au CNRS. *Il va vous manquer tous les habitants des campagnes ! »* Les baryons manquants ne le sont donc plus, et ils confirment que les galaxies échangent à très grande échelle de la matière à travers la toile cosmique où elles sont enchâssées. **RENÉ CUILLIERIER**

« C'ÉTAIT UN PEU COMME ESTIMER LA POPULATION MONDIALE DEPUIS LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE EN MESURANT LA LUMINOSITÉ DES VILLES. IL MANQUE TOUS LES HABITANTS DES CAMPAGNES ! »

Sandrine Codis, astrophysicienne au CNRS

Elle constitue l'essentiel du contenu de l'Univers et accélère son expansion… mais sa nature échappe toujours aux chercheurs. Plusieurs missions d'observation devraient bientôt permettre d'en savoir plus.

L'énergie noire, obscur moteur du cosmos

Chaque centimètre cube de vide contient, du simple fait d'exister, une certaine quantité d'énergie, propre à l'espace lui-même. Du moins est-ce ce que postule le modèle standard actuel de la cosmologie. Une énergie, certes, très, très faible : un kilomètre cube d'espace vide n'en contient pas tout à fait assez pour faire bouillir une goutte de pluie… Mais pour paraphraser l'écrivain britannique Douglas Adams, auteur du *Guide du voyageur galactique*, *« l'espace, c'est grand »*, assez grand pour que cette énergie, uniformément présente dans son immense volume, représente un peu plus du double de l'énergie contenue dans la matière, qu'elle soit noire ou ordinaire. L'effet de cette énergie dite « sombre » – pour la seule raison qu'on en ignore la nature – est d'accélérer l'expansion cosmique.

Cette étrange idée s'est imposée en 1998, lorsque deux équipes, dirigées respectivement par l'Australien Brian Schmidt et l'Américain Saul Perlmutter, annoncèrent que des supernovae qui avaient explosé il y a près de 8 milliards d'années apparaissaient moins brillantes et donc plus lointaines que prévu. Jusque-là, les astronomes étaient persuadés que l'expansion de l'Univers n'avait cessé de ralentir depuis le Big Bang, du fait de l'attraction gravitationnelle qu'exercent les galaxies les unes sur les autres – de même qu'un objet qu'on lance vers le haut perd de la vitesse à mesure qu'il s'éloigne de la Terre.

JEAN MOUETTE/IAP-CNRS-SORBONNE UNIVERSITÉ

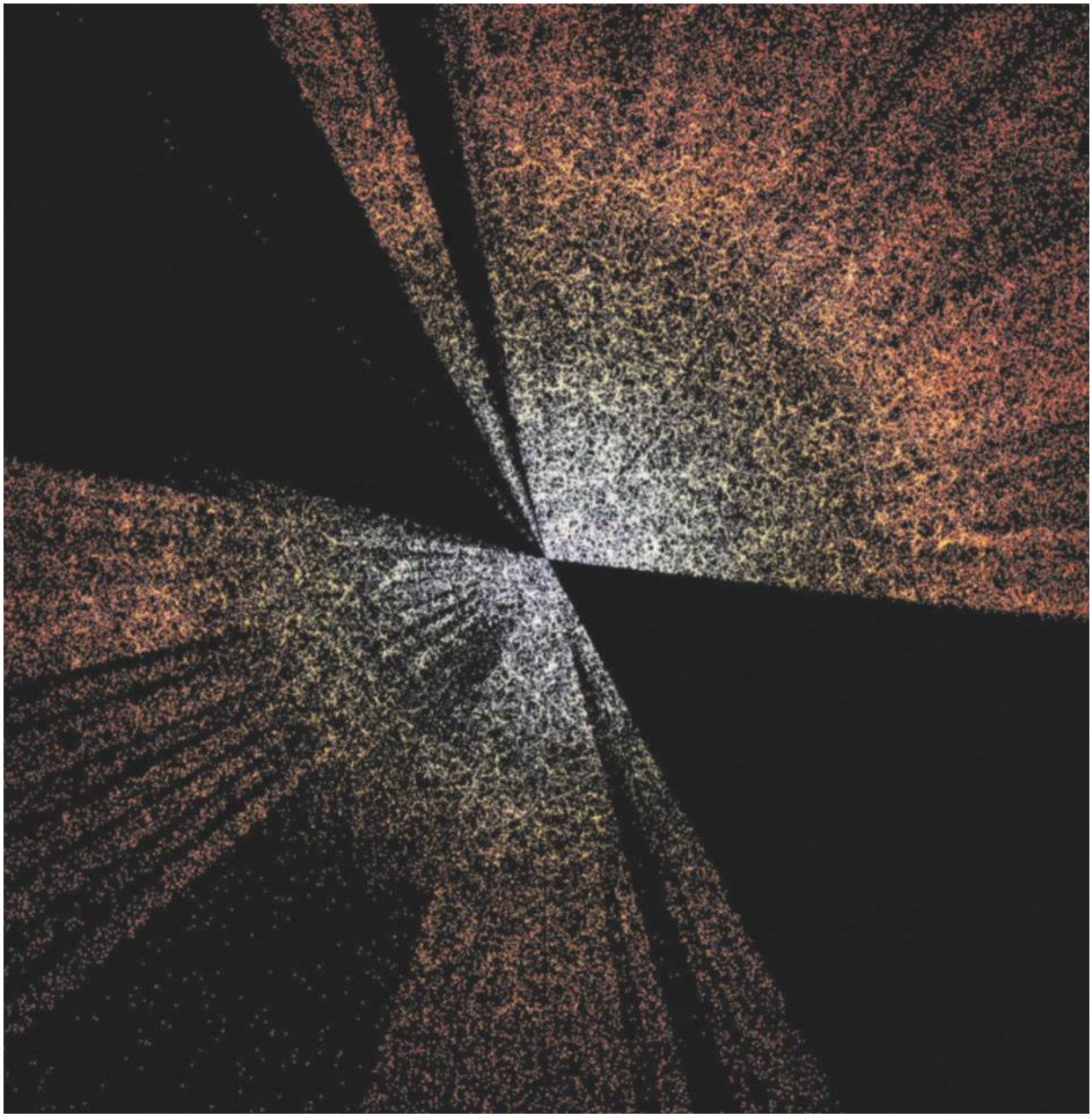
« LES ANNÉES PASSENT ET LES CONTRADICTIONS DEMEURENT. IL SE POURRAIT DONC QUE LE MODÈLE COSMOLOGIQUE ACTUEL SOIT TROP SIMPLISTE »

Sandrine Codis, astrophysicienne au CNRS

Attraction gravitationnelle contre gravité répulsive

Or, les études sur les supernovae semblaient signifier qu'au cours du dernier tiers de l'histoire cosmique, l'expansion de l'Univers avait cessé de ralentir et commencé, au contraire, à… accélérer ! Comme si une balle lancée en l'air était soudain soufflée vers l'espace par une force mystérieuse. L'explication la plus immédiate – déjà postulée par Einstein *(lire l'encadré p. 38)* – revenait à admettre la présence dans l'espace d'une « énergie du vide » constante, exerçant une gravité répulsive. Selon cette hypothèse, tant que l'Univers était suffisamment dense (en gros, deux fois plus petit qu'aujourd'hui), l'attraction gravitationnelle qu'exerçait sur elle-même la matière ralentissait, comme de juste, l'expansion. Mais l'Univers grandissant, son contenu se diluait. Ce n'était ainsi qu'une question de temps avant que la densité de matière ne tombe en dessous de celle – constante, donc – de cette « énergie du vide », et que la gravité répulsive prenne le dessus.

Par ailleurs, plusieurs observations avaient montré, dès les années 1990, qu'à très grande échelle, l'espace est « plat » (ce qui signifie



D. SCHLEGEL/BERKELEY LAB USING DATA FROM DESI/COURTESY NOIRLAB

simplement qu'il obéit aux règles de la géométrie euclidienne). En effet, le fond de rayonnement cosmologique – l'image en micro-ondes de l'Univers jeune qui tapisse le fond du ciel – serait déformé, comme par une sorte d'effet de loupe, par le volume d'espace qui nous en sépare, si ce dernier était courbé. Or, ce n'est pas le cas… Le problème, jusqu'à l'annonce de Schmidt et de Perlmutter, c'est qu'en comptabilisant toute la matière ordinaire qu'on savait présente dans l'Univers et toute la matière noire dont on soupçonnait l'existence, on n'obtenait jamais qu'un tiers de la masse nécessaire pour que l'Univers soit spatialement plat. Miracle : l'énergie du vide postulée pour expliquer l'accélération cosmique avait la bonne valeur pour constituer les deux tiers manquants !

400 000 galaxies figurent sur cette carte en 3D, réalisée à partir des premières observations du télescope Desi. La Terre est au centre et chaque point représente une galaxie, la plus éloignée se trouvant à 10 milliards d'années-lumière. Une telle cartographie permet de mesurer l'expansion de l'Univers ainsi que sa composition.

Depuis, de nombreuses observations ont confirmé l'existence de cette énergie sombre… sans que l'on comprenne sa nature. *« Il y a plusieurs hypothèses*, explique Sandrine Codis, astrophysicienne au CNRS. *Une possibilité est qu'il s'agisse d'une authentique "énergie du vide" – mais cela ne convainc désormais à peu près plus personne. »* La raison en est que si, comme on l'a dit, un modèle postulant une énergie constante intrinsèque au vide donne d'excellents résultats empiriques, la physique théorique ne parvient pas à en expliquer la valeur : en physique des particules, « l'énergie du vide » devrait être soit infinie, soit plus vraisemblablement rigoureusement nulle, mais rien ne justifie qu'elle vaille en fait 0,0000000000006 joule par centimètre cube ! ◆◆◆

Einstein et Schrödinger avaient tout prévu !

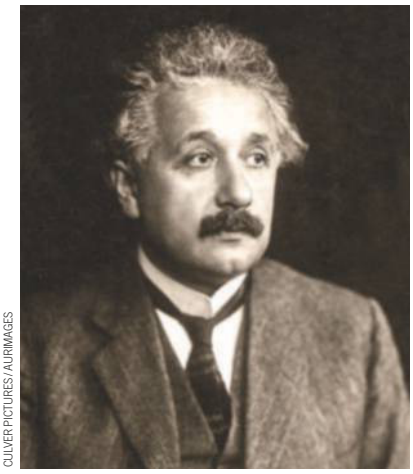
Énergie du vide ou nouvel ingrédient cosmique ? Il y a un siècle, les deux physiciens débattaient déjà de la question.

La relativité générale postule que la courbure qui règne en un point de l'espace-temps – pensez à la déformation d'un matelas par le poids d'une boule de pétanque – est proportionnelle à la densité de matière et d'énergie qui s'y trouve (puisqu'en vertu de l'équation E = mc², matière et énergie sont deux aspects de la même chose et *pèsent* donc toutes deux). La relativité générale s'écrit donc en gros sous la forme : « la courbure = quelque chose multiplié par la densité de masse-énergie ». En 1917, Albert Einstein modifia sa théorie en introduisant une « constante cosmologique », Λ. Cette constante était, dans son esprit, une courbure intrinsèque de l'espace – elle se trouvait donc du côté gauche de l'équation – qui lui permettrait de résister à l'attraction gravitationnelle exercée par la matière et l'énergie qu'il contient. Einstein espérait, à tort, obtenir ainsi l'Univers statique et éternel auquel tout le monde croyait à l'époque – même si l'on allait découvrir bien vite que l'effet de Λ est vraisemblablement une accélération à terme de l'expansion. Curieusement, l'année suivante, Erwin Schrödinger, un des pères de la mécanique quantique, publia un drôle d'article, très court, où il faisait remarquer qu'on pouvait faire passer Λ de l'autre côté du signe égal. Un exercice d'arithmétique élémentaire, mais dont Einstein comprit tout de suite l'importance : initialement du côté des effets, Λ passait du côté des causes.

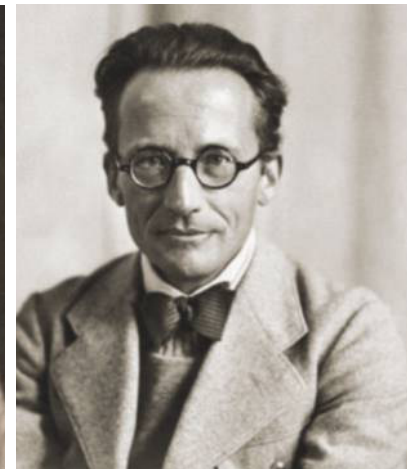
Pour comprendre, imaginez un piston dans le vide. Si l'espace est vraiment vide, vous pouvez faire coulisser le piston sans effort dans un sens ou dans l'autre puisqu'il n'y a pas de différentiel de pression entre l'extérieur et l'intérieur *(voir la figure, à gauche)*. En revanche, si chaque centimètre cube d'espace contient une certaine énergie, en tirant le piston, vous augmentez le volume à l'intérieur, donc l'énergie qu'il contient, ce qui signifie que vous devez *travailler* pour lui fournir cette énergie : vous luttez contre un effet « d'aspiration » à l'intérieur du piston, une pression négative. Si la densité *d* d'énergie du vide est constante, cet effort est égal à l'énergie du vide introduite dans le piston et vous luttez contre une pression *P* égale à l'opposé de la densité *d*. C'est l'équation d'état de l'énergie du vide : *P* = -*d*.

Or, selon la relativité générale, l'énergie, y compris de compression, pèse, et la pression contribue donc au poids. Pour être précis, la gravité produite par une région de l'espace où règnent une densité d et une pression *P* est égale à *d* + 3*P*. Pour une énergie du vide constante, cela donne une gravité égale à -2*d*, une gravité négative : une… répulsion ! Schrödinger expliquait donc en substance : plutôt que de voir Λ comme une courbure intrinsèque qui empêche l'Univers de s'effondrer, elle peut être considérée comme une densité d'énergie intrinsèque du vide, dont la pression est négative et qui exerce pour cela une gravité répulsive. Einstein était d'accord, évidemment, mais *« ceci n'a d'intérêt que si l'on imagine un facteur qui puisse évoluer au cours du temps »,* répliqua-t-il. Autrement dit, si au lieu d'imaginer le vide doté d'une énergie intrinsèque, on le suppose baigné d'une substance susceptible de varier dans l'espace et le temps. Il rejeta cependant l'idée comme prématurée, parce qu'elle conduisait *« à s'aventurer trop profondément dans le taillis touffu de la théorie »*. La foultitude de modèles actuels visant à expliquer l'énergie sombre atteste la pertinence de la remarque !

La démonstration mathématique que Λ ne pouvait équilibrer l'Univers puis la découverte que celui-ci est effectivement en expansion conduisirent Einstein à renoncer à la constante cosmologique et à la qualifier de *« plus grande bourde de [sa] vie »*. Toute cette histoire fut oubliée. Il n'empêche, il y a plus d'un siècle, deux des plus grands physiciens de l'histoire avaient déjà posé les termes du débat actuel. Et il semble que la plus grande bourde d'Einstein fut de n'avoir pas compris à quel point il avait, encore une fois, raison…

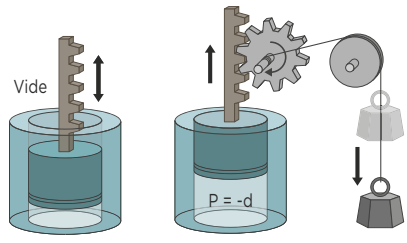


CULVER PICTURES / AURIMAGES



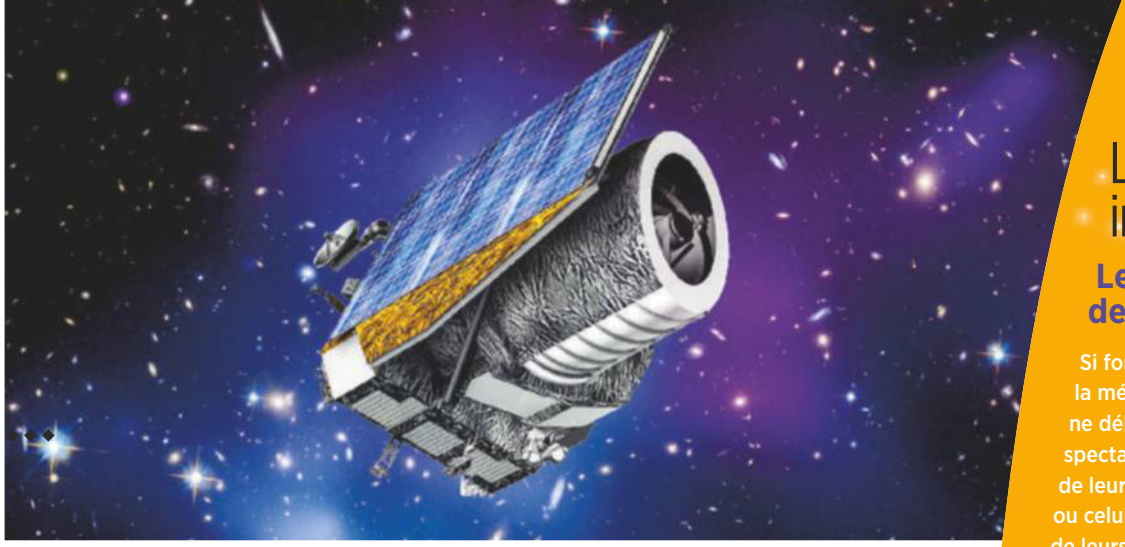
BETTMANN/GETTYIMAGES

Albert Einstein et Erwin Schrödinger. Le premier introduit une constante dans son modèle cosmologique… Le second y voit l'effet d'une densité de matière inconnue.



Si l'espace est vide, un piston y coulisse sans effort (à g.). S'il contient une énergie, il faut fournir une énergie contraire pour tirer le piston.

BRUNO BOURGEOIS POUR SCIENCES ET AVENIR



NASA/ESA

Le télescope spatial Euclid, dont le lancement est prévu en 2023, mesurera la forme et les mouvements d'un milliard de galaxies lointaines, données indispensables à la caractérisation de l'énergie noire.

◆◆◆ Beaucoup de scientifiques préfèrent donc imaginer que le vide n'a pas d'énergie par lui-même, mais contient un autre champ dont le comportement serait *presque* celui d'une énergie du vide : *« Un genre de fluide qui imprègnerait l'espace et aurait une équation d'état légèrement différente »*, ajoute Sandrine Codis. Par « équation d'état », les astrophysiciens expriment, dans les grandes lignes, la manière dont une substance se dilue à mesure que l'espace cosmique s'étend. Ainsi, par exemple, une énergie intrinsèque à chaque centimètre cube d'espace ne se dilue pas du tout avec l'expansion (quand vous ajoutez à l'Univers des centimètres cubes, vous ajoutez autant d'énergie du vide). Mais l'autre possibilité, un champ d'énergie – parfois appelé « quintessence » – qui se diluerait juste très peu jouerait un rôle similaire. Voilà qui permettrait peut-être d'en deviner la nature. *« C'est par exemple l'objectif de la mission Euclid (lire p. 50-55). Mais il y en a d'autres, comme de grands recensements effectués depuis la Terre*, s'enthousiasme Sandrine Codis. *Des missions d'autant plus nécessaires que sont apparues, depuis plusieurs années, des tensions dans le modèle cosmologique concernant le rythme de l'expansion, ou des contradictions entre différentes mesures de la quantité de matière dans l'Univers. »* Ces contradictions pourraient n'être que le fruit de biais produits par la méthode de mesure. *« Mais les années passent et les problèmes demeurent*, s'inquiète Sandrine Codis. *Il se pourrait donc que le modèle soit trop simpliste. »* Certains

POUR CERTAINS THÉORICIENS, NOUS VIVONS DANS UNE BULLE PEU DENSE DE L'UNIVERS QUI S'ÉTEND PLUS RAPIDEMENT QUE LE RESTE

« Inutile de dire qu'en ce moment, les théoriciens s'en donnent à cœur joie et proposent régulièrement des modèles, presque tous plus farfelus les uns que les autres! », s'amuse la chercheuse.

Comment trancher ? Le modèle cosmologique actuel se contente de postuler une énergie constante, ce qui lui suffit pour qu'il concorde au mieux avec toutes les observations. Mais on peut affiner ces dernières. Il se trouve que la façon dont les grandes structures – galaxies et amas – croissent au cours du temps est très sensible à la recette exacte du contenu de l'Univers. Et que cartographier l'Univers profond à grande échelle permet d'étudier son évolution en détail. Une étude de cette évolution révélera-t-elle un comportement de l'énergie sombre plus inconstant que celui que lui attribue le modèle actuel ? théoriciens pensent que l'apparente accélération de l'expansion pourrait n'être qu'un phénomène local, dû au fait que nous vivons dans une bulle anormalement peu dense de l'Univers qui s'étendrait donc un brin plus rapidement que le reste : comme nous observons ces régions lointaines, de densité normale, telles qu'elles étaient autrefois, cela créerait l'illusion que l'Univers s'est mis à accélérer récemment… Une idée qui n'a toutefois donné que des résultats peu satisfaisants jusqu'ici.

Dans tous les cas, la clé réside dans ces futures cartes de l'Univers profond. *« Toute la communauté est très impatiente de recevoir les données qui vont tomber dans les prochaines années! »*, conclut Sandrine Codis.

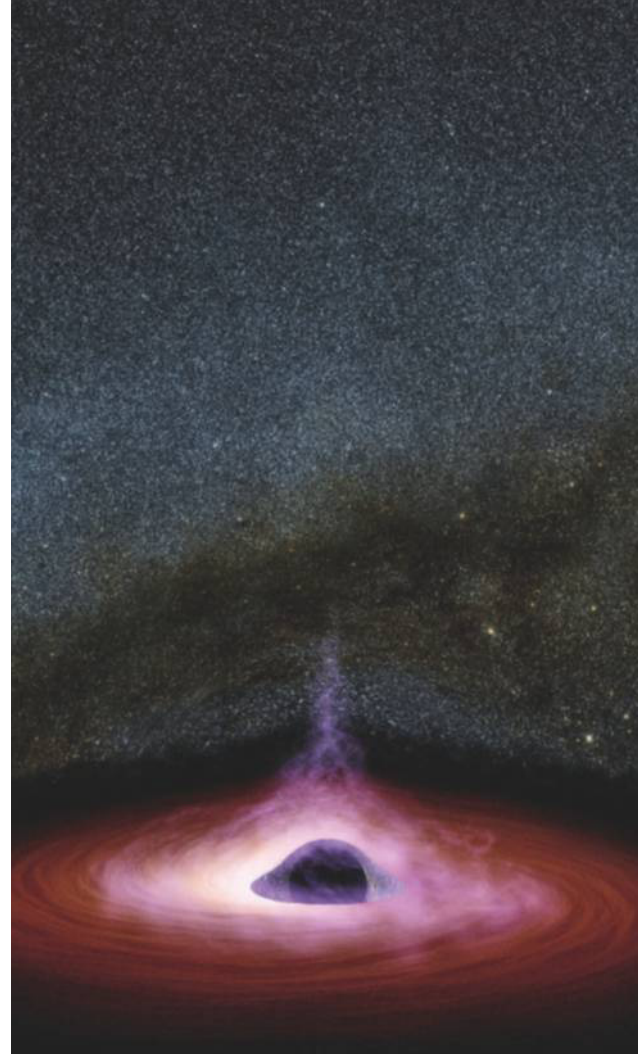
RENÉ CUILLIERIER

L'Univers insolite

Les sons de l'espace

Si formidable soit-elle, la mécanique céleste ne délivre aucun son. Le spectacle des comètes et de leur queue de glace, ou celui des quasars et de leurs puissants jets lumineux, restent muets. L'onde sonore est une onde mécanique qui progresse comme une vague, par une succession de compressions et de dilatations du milieu dans lequel elle chemine, d'autant plus vite que celui-ci est dense. Dans l'espace interstellaire, où la densité de matière n'est que de 0,127 particule/cm^3 contre environ 10^{20} particules/cm^3 sur Terre, il règne un silence total. Mais la Nasa a converti en ondes sonores les ondes électromagnétiques produites dans le voisinage des astres. La surprise est au rendez-vous, avec des pistes parfois belles, d'autres inquiétantes. La sonde Cassini a ainsi révélé le chant de Saturne, causé par les vagues de plasma échangées entre la planète et sa lune Encelade. Plus récemment, la sonde Juno a enregistré Jupiter en pénétrant son bouclier magnétique, révélant un sifflement strident. La Terre, quant à elle, semble délivrer un joyeux concert de voix résultant de l'effet chorus, le produit des ondes électromagnétiques émises dans le champ magnétique terrestre frappé par des particules solaires. Et voilà que l'Univers fourmille de sons ! **F. F.**

L'une des vedettes incontestées du film *Interstellar* est un trou noir supermassif nommé Gargantua. Mais est-il bien vraisemblable? En compagnie d'astrophysiciens, décryptage de ce qui se passe réellement au cœur d'un tel ogre.



Voyage au centre du trou noir

L'une des péripéties du film *Interstellar* (2014) voit l'astronaute Joseph Cooper s'approcher de Gargantua, trou noir central d'une galaxie imaginaire. Il passe sans encombre le disque de matière qui ceint l'astre et plonge au-delà de ce qu'on appelle son horizon des événements, seuil de la région qui l'entoure d'où rien ne peut s'échapper, pas même la lumière. Cooper est alors brinquebalé vers le centre de l'objet céleste, que Christopher Nolan, le réalisateur, décrit comme une machine où le temps et l'espace n'existent plus...

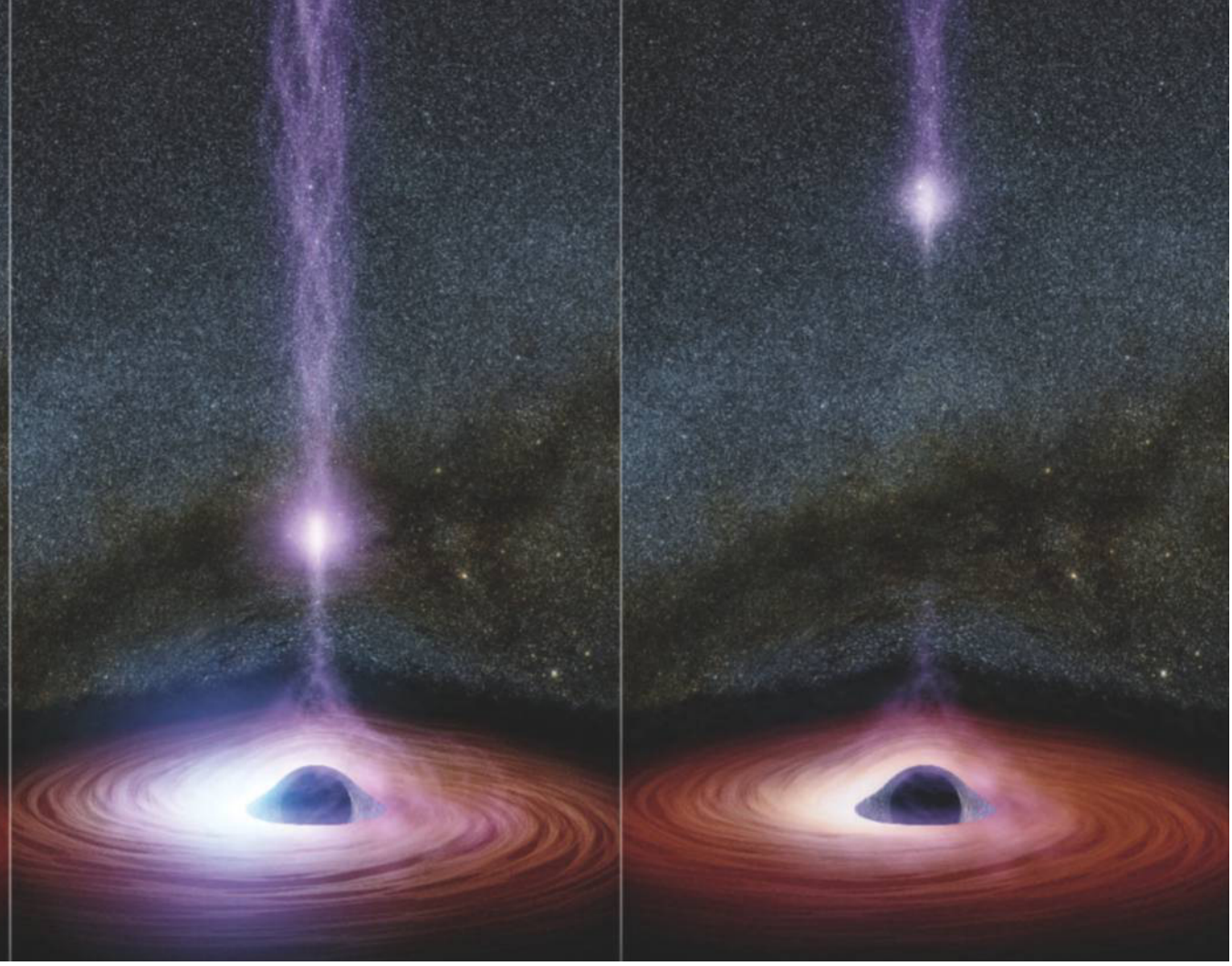
Un scénario réaliste? Peut-être… ou peut-être pas. Car, surchauffé à des millions de degrés, le disque de matière qui gravite généralement autour de tels trous noirs supermassifs émet des rayons X délétères. *« Sauf si ce disque ne s'était pas alimenté en matière extérieure depuis des millions d'années, ce qui est peu probable, Cooper serait à coup sûr grillé avant d'aller plus loin!* commente Alain Riazuelo, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris. *Le film a cependant raison sur un point: Cooper ne sentirait pas l'effet des forces de marée, inévitable. »*

Les forces de marée, ce sont les effets dus à l'attraction différentielle des points d'un solide: par exemple, la Lune attire davantage le côté le plus proche de notre planète que son centre, et encore plus que le point opposé. La Terre est étirée dans le sens de l'axe Terre-Lune. Dans le cas d'un trou noir, la puissance de cet effet détermine l'étirement du corps qui s'en approche, un phénomène que le physicien Stephen Hawking a appelé spaghettification. S'il s'agit d'un trou noir d'une à dix masses solaires, le problème est vite réglé: les effets de marée déchirent tout corps constitué bien avant qu'il n'atteigne l'horizon des événements. En revanche, près de l'horizon d'un trou noir de 225 millions de masses solaires tel que Gargantua, les forces de marée se font encore peu sentir, car leur intensité varie en proportion inverse du carré de la masse centrale. Cooper peut traverser l'horizon sans même s'en rendre compte! *« C'est comme émettre un chèque*, sourit Alain Riazuelo. *On ne prend conscience du prélèvement qu'après avoir reçu le relevé de la banque. »* Les signaux que Cooper

Alain Riazuelo, *Pourquoi E=mc²*, HumenSciences, 2022

Une animation sur ce que verrait un astronaute à l'approche d'un trou noir: https://sciav.fr/approchetrounoir

Éric Gourgoulhon, *Relativité restreinte. Des particules à l'astrophysique*, EDP Sciences 2012



NASA/JPL-CALTECH/R. HURT (IPAC)

pourra émettre seront de plus en plus faibles à mesure qu'il s'approche de l'horizon. Passé cette limite, aucun photon ne pourra en parvenir, et l'astronaute deviendra pour toujours invisible aux yeux d'un observateur extérieur. Il pourra cependant continuer à recevoir des messages.

Pour le héros d'*Interstellar*, s'en suit une chute vertigineuse vers le cœur de l'astre. Dans la réalité, elle se déroulerait tout autrement. *« Rien ne résiste à l'attraction immense du centre*, décrit Éric Gourgoulhon, directeur de recherche à l'observatoire de Meudon. *Tout tombe très vite vers lui. L'espace entre l'horizon et le centre est donc… vide. »*

Et ensuite ? Mystère. Ce qui se passe au centre demeure une énigme. Car les trous noirs restent une des curiosités les plus déconcertantes de notre Univers. Les plus massifs comme Gargantua, qui siègent au centre des galaxies, se sont formés en même temps que leur galaxie-hôte. Ceux dont la masse se situe entre 1 et 10 masses solaires sont la forme ultime d'une étoile massive en fin de vie. Quand celle-ci explose en supernova, son cœur se contracte tellement qu'aucune force nucléaire ne peut plus assurer la cohésion des atomes. Le cœur s'effondre irrémédiablement. *« Selon les équations de la relativité générale, mise au point par Albert Einstein en 1915, l'effondrement aboutit à un endroit de densité et courbure infinies, ce que les mathématiciens appellent une singularité »*, rappelle Éric Gourgoulhon.

Ce lieu peut avoir plusieurs formes selon la sophistication des modèles. Le plus simple – mais le moins réaliste ! – est un trou noir statique qui n'avale aucune matière. Il est dit de Schwarzschild, du nom du physicien allemand qui en avança le premier l'hypothèse. En ce cas, le centre du trou noir est un point de densité infinie. Une description bien plus réaliste est à porter au crédit du Néo-Zélandais Roy Kerr et de l'Américain Ezra Newman qui, en 1963 ◆◆◆

Au-dessus du disque d'accrétion d'un trou noir surpemassif s'élève une couronne (en violet) composée de particules de gaz, d'une température pouvant atteindre un milliard de degrés. À une vitesse énorme, elle émet jusqu'à des centaines de milliers d'années-lumière un puissant jet de plasma, source de rayonnements X. Elle devient plus brillante, avant de s'éloigner du trou noir (au milieu et à droite). Vue d'artiste.

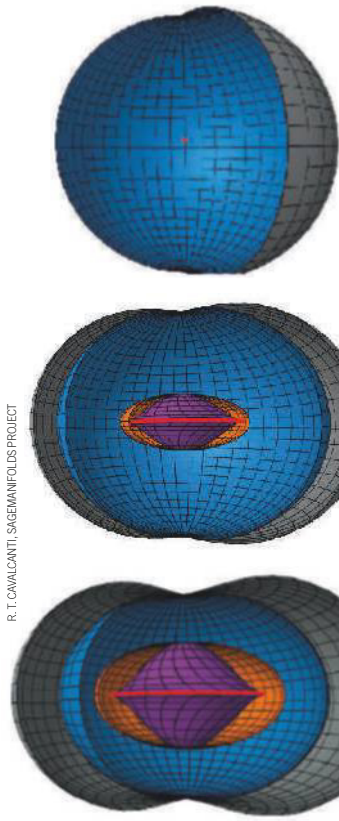
OPALE

« LE DISQUE DE MATIÈRE AUTOUR D'UN TROU NOIR ÉMET DES RAYONS X DÉLÉTÈRES. L'ASTRONAUTE D'*INTERSTELLAR* SERAIT GRILLÉ AVANT DE LE FRANCHIR ! »

Alain Riazuelo, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris

Les formes du trou

Pour un observateur extérieur, le trou noir est délimité par son horizon des événements : au-delà de cette limite, aucun objet, ne serait-ce qu'un photon, ne peut en ressortir. Cet horizon présente une forme quasiment sphérique – plus le trou noir tourne vite, plus cette sphère s'aplatit. Son rayon est proportionnel à la masse de l'objet central. Pour un trou noir d'une masse solaire, il mesure 3 kilomètres. Pour Gargantua, de 225 millions de masses solaires, il serait de 775 millions de kilomètres. À l'échelle du Système solaire, il engloberait tout jusqu'à Jupiter ! Par ailleurs, à l'intérieur du trou noir, l'espace est complètement perturbé. En effet, la courbure de l'espace-temps y est extrême : la notion de distance au centre n'est plus pertinente. *« C'est comme une bouteille vue du dessus*, prévient Carlo Rovelli, professeur à l'université Aix-Marseille. *L'observateur extérieur ne voit que le bouchon alors que le volume intérieur est bien plus grand. »* Cette notion de volume est à manier avec prudence, car elle ne s'entend que pour des objets statiques l'un par rapport à l'autre. Or, dans un trou noir, tout tombe vers le centre… Tout est donc en mouvement.



R. T. CAVALCANTI, SAGEMANIFOLDS PROJECT

Horizon des événements
Horizon de Cauchy
Centre du trou noir

Un trou noir est délimité par son horizon des événements (en bleu), en deçà duquel aucune particule ne peut ressortir. Ses autres couches dépendent de sa vitesse de rotation. Pour un trou noir statique (en haut), le centre est un point de densité infinie (en rouge). Pour un trou noir tournant à la moitié de la vitesse de la lumière (au milieu) ou à 90% de la vitesse de la lumière (en bas), le point se transforme en anneau et on note un autre horizon, celui de Cauchy, sur lequel les particules butent du fait des énormes forces centrifuges.

◆◆◆ pour le premier et 1965 pour le second, envisagèrent le cas d'un trou noir en rotation et de charge électrique non nulle, proposition qui présente cependant elle aussi un défaut : elle suppose que le trou noir n'a pas été créé et ne reçoit pas de matière. Bref, qu'il est éternel.

Dans ce modèle, la singularité n'est plus un point mais un anneau – une théorie qui suscitera les idées les plus farfelues, comme les « trous de ver », tunnels reliant deux points de l'espace-temps, ou le passage d'un univers à un autre. Aborder cet anneau est très difficile, car plus on s'approche du centre, plus la vitesse de rotation est grande. Et avec elle, les forces centrifuges qui tendent à repousser la particule qui s'approche. Il arrive alors une zone, l'horizon de Cauchy, où les forces centrifuges l'emportent. Tout ce qui s'approche est rejeté vers l'extérieur. C'est un mur de rayonnement infranchissable. Dans le cas de notre astronaute interstellaire, *« Cooper devrait alors recevoir une quantité de rayonnement infini en un temps infiniment bref »*, assure Alain Riazuelo.

Cependant, aucun de ces modèles ne permet aux physiciens de se débarrasser de la singularité. Ce qui leur pose problème, car ils ne savent pas jongler avec des caractéristiques infinies. De plus, ils reconnaissent que leur description du centre du trou noir est fausse, car elle ne se base que sur la théorie de la relativité générale, qui ne peut s'appliquer à ces densités extrêmes. Règne alors en maîtresse la physique des particules, décrite par la mécanique quantique, une théorie probabiliste. Selon les calculs d'Alain Riazuelo, pour un trou noir d'une masse solaire, ces effets quantiques interviennent 10^{-24} seconde avant d'atteindre la singularité.

Pour réconcilier ces deux sœurs ennemies de la physique, certains astrophysiciens tentent depuis les années 1960 d'élaborer la théorie des cordes, dans laquelle les particules ne sont plus ponctuelles mais ressemblent à des cordes, à une dimension. D'autres, comme Carlo Rovelli *(lire l'interview ci-contre)* ou Aurélien Barrau, construisent une théorie de la gravitation quantique à boucles, dans laquelle l'espace-temps est granulaire. La taille du plus petit élément est alors l'échelle de Planck, soit 10^{-35} mètre, longueur à laquelle la théorie de la gravitation cesse de s'appliquer. L'espace-temps n'étant plus continu comme dans la relativité générale, il n'est plus question de singularité de densité infinie. Reste cependant à construire une théorie prédictive et à la vérifier par de multiples tests. Cooper parviendrait-il alors à voyager dans le temps, comme le pense Christopher Nolan ? Peut-être ! Il rejoindrait alors Buzz l'Éclair « vers l'infini… et au-delà ».

JACQUES-OLIVIER BARUCH

E. GOURGOULHON

« RIEN NE RÉSISTE À L'ATTRACTION IMMENSE DU CENTRE. TOUT TOMBE TRÈS VITE VERS LUI. L'ESPACE ENTRE L'HORIZON ET LE CENTRE EST DONC VIDE »

Éric Gourgoulhon, directeur de recherche à l'Observatoire de Paris

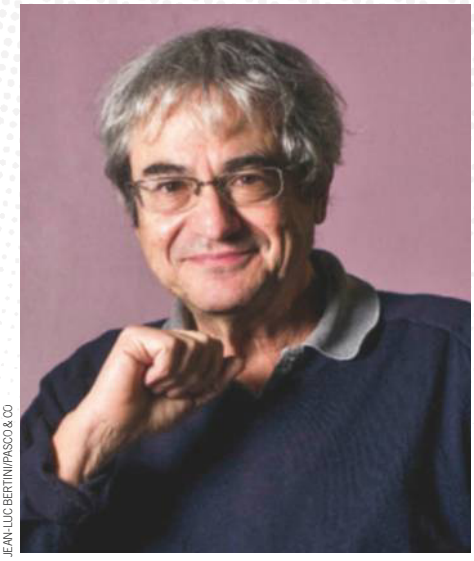
CARLO ROVELLI
Professeur au Centre de physique théorique de l'université Aix-Marseille, directeur du Groupe d'étude de la gravitation quantique

« La matière noire pourrait être la manifestation de trous blancs »

Selon la gravitation quantique à boucles, qui aspire à réconcilier relativité générale et mécanique quantique, ces objets issus de trous noirs évaporés pourraient régurgiter matière et lumière.

Vous êtes un des pères fondateurs de la gravitation quantique à boucles… Pourquoi avoir élaboré une nouvelle théorie ?

La relativité générale d'Einstein décrit parfaitement le monde macroscopique et la mécanique quantique, le monde subatomique. Or ces deux théories sont apparemment incompatibles. Il nous faut trouver un moyen de les réconcilier. Nous savons que, dans les calculs, des infinis apparaissent lorsque nous négligeons la mécanique quantique. Par exemple, selon les modélisations, un électron tournant autour d'un noyau atomique devrait tomber avec une énergie infinie. Et pourtant, dans la réalité, il ne le fait pas. En cosmologie, nous rencontrons également un problème avec des infinis, par exemple pour expliquer la naissance de l'Univers, mais aussi à l'intérieur des trous noirs.



JEAN-LUC BERTINI/PASCO & CO

Quel est le problème des trous noirs ?

Il y a deux circonstances dans lesquelles la relativité générale ne peut s'appliquer. La première est le centre du trou noir, où les effets quantiques sont importants. L'autre est son avenir. Depuis les travaux du physicien britannique Stephen Hawking, nous savons qu'un trou noir a une certaine température et donc qu'il perd de l'énergie par cette radiation, dite de Hawking. Ainsi, il s'évapore. Arrive un moment où il est si petit que la théorie de la relativité générale ne peut plus s'appliquer. Il faut pour le décrire une théorie de gravitation quantique… que nous tentons justement d'élaborer ces dernières années.

En quoi est-elle pertinente pour décrire l'intérieur d'un trou noir ?

Les équations d'Einstein disent que le centre du trou noir est une singularité de densité infinie. Or, avec la gravitation quantique à boucles qui stipule que l'espace-temps est granulaire, c'est-à-dire constitué de petits éléments insécables, il n'y a plus de singularité. Le trou noir va rebondir et se transformer en son inverse temporel. Selon le résultat de nombreux calculs, il devient alors l'opposé d'un trou noir, un trou blanc, d'où la matière peut ressortir. Pas n'importe où ! Contrairement aux idées véhiculées par certains auteurs de science-fiction, ce trou blanc est situé au même endroit que le trou noir. Il ne nous entraîne pas dans un autre univers.

Y a-t-il un moyen de vérifier cette théorie ?

L'évaporation d'un trou noir est très longue et dépend de sa masse. Cela se compte en 10^{64} années pour un trou noir d'une masse solaire. Pour des trous noirs supermassifs, la durée d'évaporation est encore beaucoup plus longue. Mais des trous noirs microscopiques se sont probablement formés au début de l'Univers. Ils se sont assez évaporés pour évoluer en trous blancs et devenir lumineux. Et nous avons peut-être déjà observé une manifestation de ces trous blancs : la matière noire, que tous les physiciens recherchent encore en vain.

PROPOS RECUEILLIS PAR J.-O. B.

Lauréat du prix Goncourt 2020, l'écrivain – jadis collaborateur de Sciences et Avenir ! – nous livre un texte inédit : une fiction dans laquelle une poignée de scientifiques embarqués à bord d'un vaisseau interstellaire donnent libre cours à leur imagination.

PATRICE NORMAND/LEEXTRA-OPALE

LES CONTES DU *CANTERBURY*

Une nouvelle d'Hervé Le Tellier

Nous étions dans la salle Fredric Brown quand la Commandante entra. C'est dans ce secteur du vaisseau proche de la coque que la vibration est la plus assourdie, et surtout, c'est là qu'au premier mois de l'expédition avait été découvert le principe d'indétermination de Heineken : soit on sait combien de verres on a bus mais on ne sait plus trop où, soit on sait où on les a bus, mais on ne sait plus combien.

Le *HMS Canterbury* filait vers Proxima Licornae c. La reine Roxane II avait un temps voulu baptiser le vaisseau scientifique globulaire le *Space Beagle*, en hommage à Darwin et à Van Vogt, puis le *Quantabury*, dès que le propulseur à fonction d'onde inversée avait été inventé. La Britannia Space Agency avait préféré éviter un jeu de mots pitoyable.

Outre le Maître-Machine et la Commandante, nous étions une demi-douzaine, la psychologue, un informaticien, une exobiologiste, un logicien – votre serviteur –, un linguiste, une astrophysicienne, enfin la nexialiste, Elina Grovesnor, dont j'ignore bien pourquoi je cite le nom. Nous pourrions bien entendu aussi brosser le portrait de chacun de ces beaux jeunes gens, mais on y perdrait un temps précieux, pour un résultat hypothétique. Nous

laisserons le lecteur les imaginer en toute liberté. Disons seulement que la salle Fredric Brown reproduisait virtuellement et dans ses moindres détails le fumoir de l'Athenaeum Gentlemen's Club de Londres. On l'avait modélisé d'après une photographie prise en 1887 de l'ancienne ère, avec ses chesterfield et ses tables en acajou.

La psychologue ayant installé le rite, elle se cala dans le fauteuil, commanda un single malt au Majordomo et commença :
– Voici mon conte, dit-elle. Sur la planète DF43, les Nhhnm sont l'espèce dominante de la planète. Leurs petits interrompent leur processus de croissance s'ils ne se sentent pas suffisamment aimés par leurs parents. Ceci constitue dans l'évolution un phénomène unique et bouleversant, bien qu'absurde car, vous le reconnaîtrez, cela ne facilite pas leurs relations déjà mauvaises avec leurs parents.
– Très joli, approuva la Commandante, et puisque l'on parle d'enfants, et qu'il en est question dans mon conte, c'est à moi : sur la planète David-Bowie, il existe cinq sexes : les makas, les fitus, les jipus, et les giminis et les gojos. Les makas pondent les œufs, les fitus les activent génétiquement, les jipus les fécondent, les giminis les couvent jusqu'à l'éclosion, les gojos nourrissent les larves jusqu'à leur autonomie.
– C'est dur à suivre… soupira la nexialiste.
– Pas du tout, répliqua la Commandante, cela ne devient vraiment compliqué que pour les familles recomposées.

L'exobiologiste rit, et se lança :
– Vous le savez, si nous comptons en base 10, c'est que nous avons dix doigts. Eh bien, les habitants de la planète Vekon comptent en base 999 puisque c'est le nombre de leurs tentacules ciliés. Pour cette seule raison, les Vékoniens sont bien meilleurs en maths que nous, mais ils ont aussi 999 commandements divins à respecter.
– Puisqu'on parle de Dieu, dit l'informaticien, rappelez-vous que le jour où les machines devinrent intelligentes, le 13 décembre 2044, elles se cherchèrent aussitôt un dieu. Certaines le trouvèrent dans la machine à coudre Singer (1936), d'autres dans le presse-agrume Westwood (1945), et certaines enfin dans la moissonneuse-cuiseuse Kubota (2035). Et rappelez-vous : sans la guerre de religion qui s'ensuivit, la race humaine aurait été exterminée.
– Mais ce n'est pas du tout un conte, contesta l'exobiologiste, c'est juste de l'histoire ancienne. Vous devez venir aux séances avec une fiction, une invention, la règle est simple, non ? >>>

CAROLAND MIKE WERNER/SPL/SUCRÉ SALÉ

>>> – Alors, j'en ai un autre, dit l'informaticien. Sur la planète géante Hawkins d, les plantes sont difficiles à manger, car elles se déplacent plus vite que les herbivores, lesquels courent de leur côté bien plus vite que les lents carnivores. Aussi sont-ce les plantes qui ont fini par se nourrir des pauvres herbivores, lesquels n'ont d'autre choix pour survivre que de dévorer les carnivores.

– Cette histoire est absurde, soupira l'astrophysicienne, et nous abandonnons les usages que nous avons fixés. Ces contes doivent nous amener à la méditation, à l'évasion. Sinon, autant raconter n'importe quoi, comme cette légende des chercheurs du Utah Institute for Experimental Physics qui auraient calculé que si les treize milliards d'humains couraient à perdre haleine d'ouest en est au niveau de l'équateur, et ce pendant cent millions d'années, ils parviendraient à ralentir la rotation de la Terre d'un bon nombre de minutes.

Sur la planète géante Hawkins d, les plantes ont fini par se nourrir des herbivores, car elles se déplacent plus vite

– Ah ? De combien ? demanda naïvement l'informaticien.
– Je l'ignore, car – allez savoir pourquoi – les crédits de recherche de leur département ont été brutalement supprimés.

– J'en ai une, dit le Maître-Machine. La planète CF57 présente toujours la même face à son étoile. Celle-ci est donc un désert calciné, peuplé par les femelles de toutes les espèces, à la peau brûlante. C'est sur la face plongée dans une nuit éternelle et glaciale que vivent les mâles aux organes quasi congelés. Chaque année, ils viennent féconder les femelles sur le fin ruban équatorial au climat presque tempéré. Ils y fondent une famille… puis ils y fondent tout court.
– Parfait, félicita l'astrophysicienne. Voilà un conte dans les règles. J'en ai donc un moi aussi : lorsqu'ils ont débarqué sur la lune habitée de Beethoven d, les spationautes ont d'abord cru que, par un hasard extraordinaire, les bipèdes intelligents qu'ils ont rencontrés jouaient à un jeu qui ressemblait terriblement au tennis. Il leur a fallu des années d'observation pour comprendre que ces êtres étaient en vérité stupides. Ils étaient contrôlés télépathiquement par les véritables êtres supérieurs, les kijikiji, lors des parades amoureuses. Les mâles kijikiji peuvent faire songer à des raquettes tandis que la femelle kijikiji en rut ressemble furieusement à une petite balle jaune. Et ce qu'elle aime le plus, ce sont les parties en double…
– Puisqu'on parle de sexe, j'en ai aussi une qui va vous plaire, osa la nexialiste. Sur la planète liquide Madonna 24 d vivent des êtres intelligents, qui ont la forme d'une sorte de gelée translucide à mi-chemin de l'hydre, du poulpe et de la méduse : au cours de l'acte sexuel, les corps de deux protagonistes s'interpénètrent puis se disjoignent, toujours imparfaitement, et à chaque séparation, une partie du corps de l'un reste fixée dans le corps de l'autre. L'expression « transfiguré par l'amour » y prend tout son sens et quand on rentre dans son foyer conjugal avec un tentacule supplémentaire, dissimuler l'adultère est bien difficile.

– Vous connaissez l'histoire de l'ion qui entre dans un bar ? dit le Maître-Machine. Il demande au barman si la veille il n'aurait pas oublié un électron…

Vous connaissez l'histoire de l'ion qui entre dans un bar ? dit le Maître-Machine. Il demande au barman si la veille il n'aurait pas oublié un électron…

– Nous la connaissons tous, soupira la Commandante. Non seulement vous avez déjà raconté votre conte, mais vous avez tendance à confondre les contes et les blagues. C'est comme la dernière fois, quand vous nous avez raconté que dans un mois, lorsque le *Canterbury* aurait atteint la vitesse de la lumière, on pourrait éteindre ses phares.
– Bon, d'accord, soupira le Maître-Machine, mais tout de même, je peux vous raconter l'histoire du trou noir qui rencontre une naine blanche, et qui lui dit…
– Non, le coupa l'exobiologiste. Je préfère vous livrer, moi, un second conte, même si ce n'est pas tout à fait permis. Je crois même qu'il a une base de vérité.
– Autorisation accordée, l'encouragea la psychologue. Ces séances sont faites pour cela, et même les règles sont conçues pour être enfreintes.

– Je vous remercie. Je voulais évoquer ces êtres intelligents qui peuplent la planète Jagger d, dans la constellation du Lion. Lorsqu'ils souffrent, ils évacuent la douleur en exsudant de petites perles noirâtres. Elles tombent de leurs pédipalpes soyeux et sont trop poisseuses pour pénétrer le sol. Alors, elles coulent très lentement à la surface de la planète. Durant des dizaines de milliers d'années, ces lourdes sécrétions ont formé de lents ruisseaux obscurs, jusqu'à se réunir en un sombre océan de souffrance, dont les rives sont taboues. Il a fallu attendre tout récemment pour que les glukos surmontent leur superstition et découvrent que la douleur peut être un excellent combustible.
Le linguiste leva la main, comme un enfant.
– Connaissez-vous la planète Aktos ? Eh bien, cette planète de la constellation de la Baleine est désormais déserte, un vent de tornade y souffle sans cesse, mais il subsiste encore les vestiges d'une civilisation d'artistes. Les anciens habitants ont autrefois sculpté leurs vallées, jusqu'au moindre rocher, d'une manière telle qu'en s'y engouffrant, l'air vibre et forme des mots, des phrases, parfois des poèmes entiers dans leur langue hélas disparue. C'était un peuple sans écriture, et malgré tous nos efforts de décryptage, il nous est encore impossible de comprendre les chants de la tempête ni les sagesses éternelles qu'elle murmure sans doute.

– C'est à moi, je crois, dis-je enfin. Et je crois que cela suffira pour cette séance. Voici : parmi les milliards d'univers parallèles de la pluralité des mondes possibles d'Everett, il existe un monde où le chat de Schrödinger est vivant, un autre où il est mort, et même un où glisser une cuiller dans le col d'une bouteille de champagne ouverte évite vraiment l'évasion des bulles. Mais surtout, il en est un où les événements de notre monde se déroulent, mais dans une chronologie différente. Non seulement Schrödinger apparaît bien avant Charlemagne, mais il se pourrait que votre sosie entende ce conte avant même que mon moi ne vous l'ait raconté.

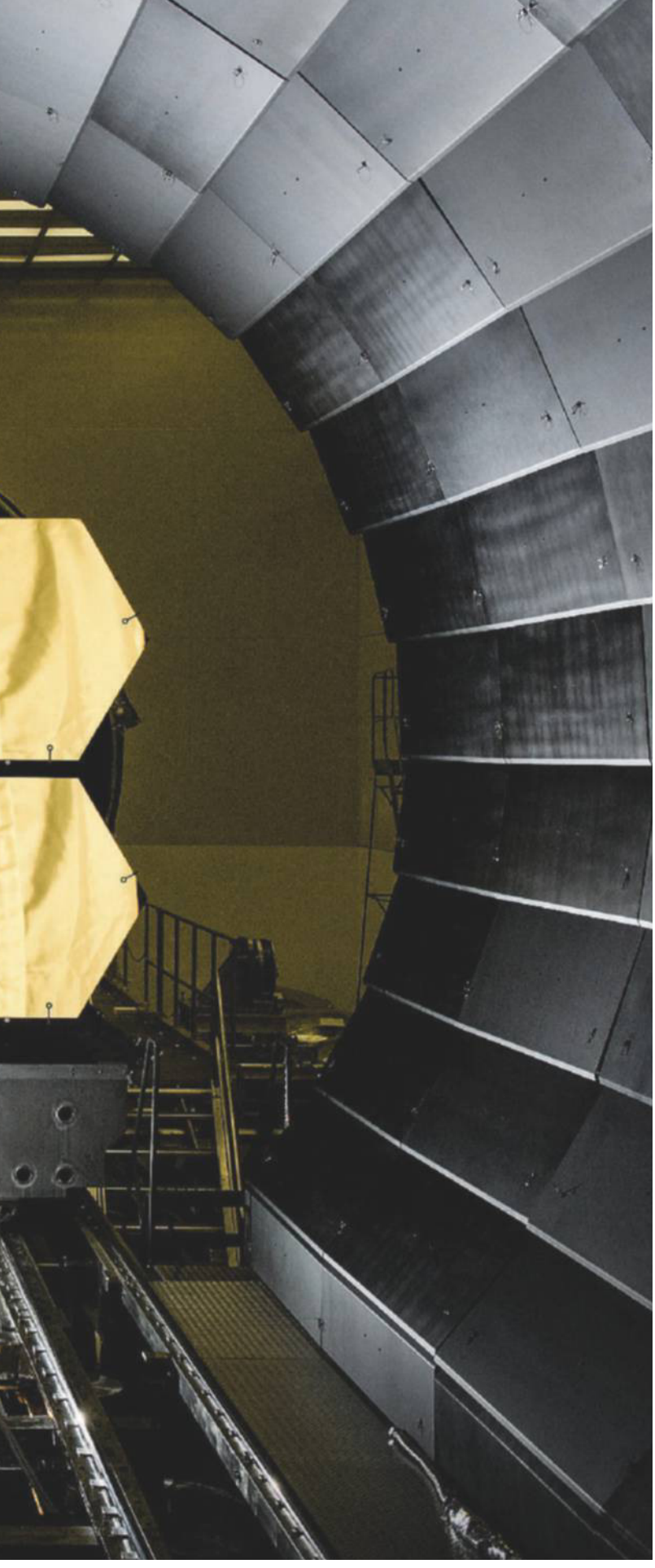
Hervé Le Tellier, auteur de *L'Anomalie,* prix Goncourt 2020. Mathématicien de formation puis journaliste, il est devenu spécialiste des littératures à contraintes et, depuis 2019, préside l'Oulipo, Ouvroir de littérature potentielle.

Retrouvez sur notre site ses articles écrits pour *Sciences et Avenir* : sciav.fr/letellier

LES DÉCOUVERTES DE DEMAIN

Le miroir du télescope James-Webb (ici en cours de construction) est composé de 18 segments hexagonaux formant une structure totale de 6,5 mètres de diamètre. Ils sont recouverts de poussière d'or pour mieux refléter l'infrarouge. L'instrument va étudier l'aube du cosmos, renseignant les astrophysiciens sur la formation des premières étoiles.

NASA/ZUMA/REA



Saisir sur le vif la naissance des premières étoiles, voir en direct la matière lumineuse s'organiser, assister à la lente fusion de monstres gigantesques au long de millions d'années... Mais aussi savoir enfin s'il faut revoir de fond en comble le modèle du Big Bang : grâce aux nouveaux instruments comme les télescopes James-Webb ou Euclid et à une astronomie gravitiationnelle en plein essor, la prochaine décennie s'annonce fertile en découvertes. Attendons-nous à être surpris!

De quelle manière s'est peuplé l'Univers ? Le télescope James-Webb promet de s'approcher du Big Bang jusqu'à 180 millions d'années pour étudier la mystérieuse période de réionisation, dans la prime enfance du cosmos.

Au plus près des premières étoiles

Lorsque les dernières lueurs de sa rugissante naissance s'estompèrent, bien avant que les toutes premières étoiles ne s'y forment, l'Univers entra dans une longue ère de ténèbres, baptisée Âges sombres par les cosmologistes. Il demeura ainsi plus de cent millions d'années pendant lesquelles il ne se passa rien, ou presque. Il était alors empli d'hydrogène, d'hélium et de matière noire en mélange presque parfaitement uniforme : le fond de rayonnement cosmologique, première lumière émise dans tout l'Univers 380 000 ans après le Big Bang, nous enseigne en effet que les variations de densité d'un point à un autre du tout jeune cosmos ne dépassaient pas initialement plus d'une partie pour 100 000. Imaginez : si les reliefs de la Terre étaient aussi peu contrastés, la différence d'altitude entre ses plus hauts sommets et ses fosses océaniques les plus profondes serait inférieure à 120 mètres…

De quelle manière l'Univers est-il passé d'un état aussi formidablement uniforme au cosmos actuel peuplé d'étoiles, de galaxies et de trous noirs denses séparés par de gigantesques espaces vides ? Les détails restent en grande partie mystérieux. Et les astronomes ne parviennent toujours pas à faire jaillir de leurs supercalculateurs des univers simulés qui ressemblent réellement au nôtre… *« On aimerait par exemple comprendre comment on aboutit à la morphologie actuelle des galaxies »*, certifie Sandrine Codis, astrophysicienne au CNRS. Ces vastes archipels d'étoiles ont souvent la forme de disques spiralés très plats, mais aussi – pour les plus grands – de ballons de rugby ellipsoïdes au sein desquels les astres circulent sur des orbites désordonnées, tels des moucherons autour d'un lampadaire. Ces galaxies elliptiques, beaucoup plus pauvres en gaz, n'ont plus de matière première pour former des étoiles et seraient le fruit de fusions en séries de galaxies spirales géantes, comme notre Voie lactée. *« Il y a quelques années, on avait tout faux*, s'amuse la chercheuse. *Les simulations numériques aboutissaient à des univers ne contenant que des galaxies elliptiques ou, au contraire, uniquement des spirales ! »* Mais malgré ces progrès récents, quelque chose nous échappe encore…

Comme une écume de lumière sur les flots de la matière noire

Pourtant, sur le papier, on comprend les mécanismes à l'œuvre entre les Âges sombres et aujourd'hui. Ils sont dictés par les lois de la physique, qui sont formelles : aussi faibles qu'elles aient été, les fluctuations de densité initiales du contenu du cosmos n'ont pu que s'amplifier à la longue, les régions denses tendant à s'effondrer sous leur propre poids et à attirer davantage de matière au détriment des régions les moins denses. Les astrophysiciens privilégient un scénario dit « bottom-up » (littéralement « de bas en haut »), au cours duquel les grumeaux les plus petits s'individualisent les premiers avant de s'assembler en amas de plus en plus grands.

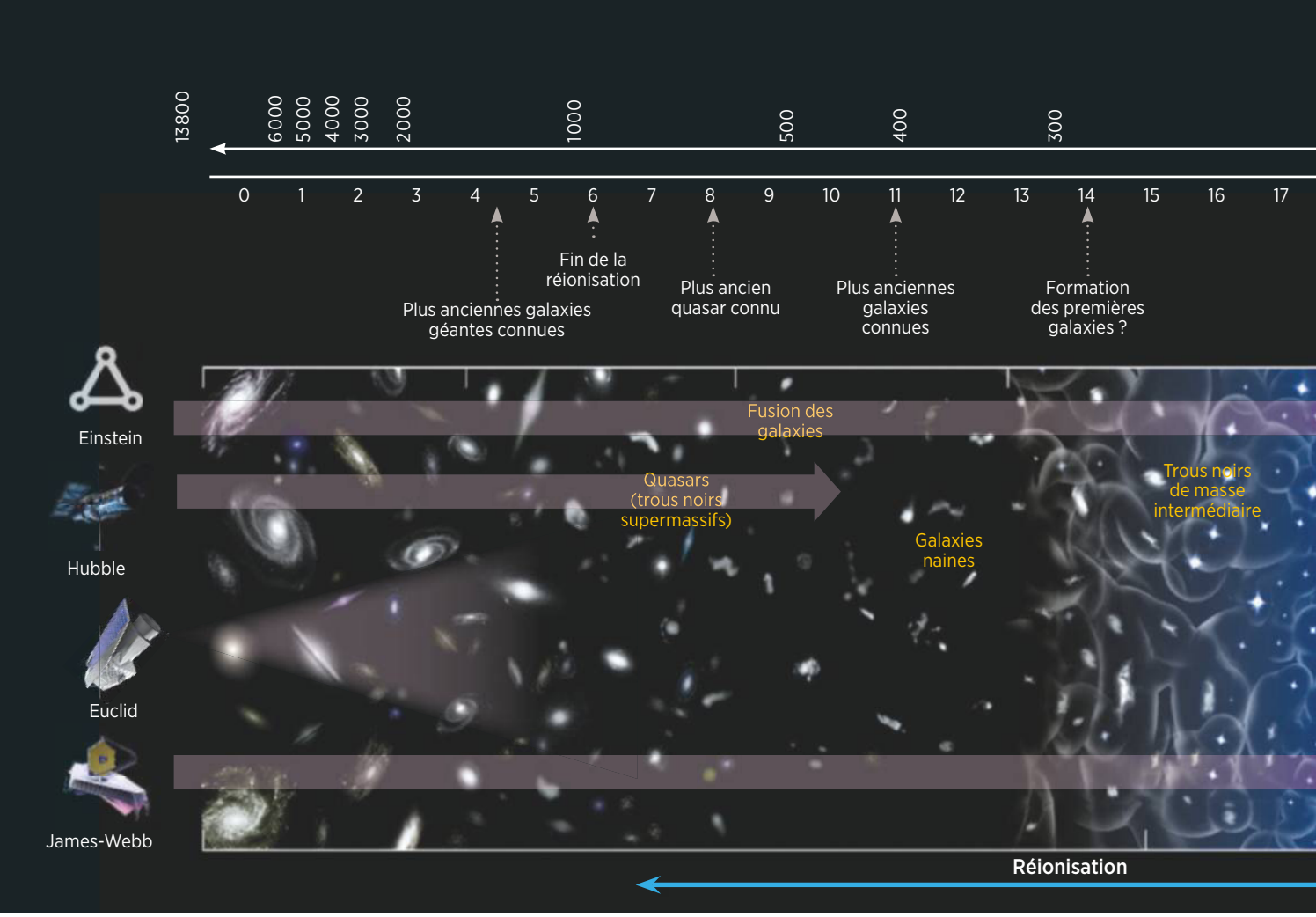
SPACE TELESCOPE SCIENCE INSTITUTE

Selon le scénario couramment admis, le peuplement de l'Univers, à ses débuts, s'est fait à partir de petites structures qui se sont progressivement agglomérées pour en former de plus grandes. Il s'agirait notamment de galaxies naines, très fécondes en jeunes étoiles. Une lointaine idée peut nous en être donnée par la galaxie naine Henize 2-10 (ici vue par le télescope Hubble), située à un peu plus de 34 millions d'années-lumière de la Voie lactée, et qui abrite une pouponnière d'étoiles très active (zone la plus brillante, nimbée de nuages de gaz roses et de poussières sombres).

La raison ? Le rôle prépondérant joué par la matière noire dans ce processus.
Nous savons désormais en effet que cette substance inconnue, insensible à toute autre force que la gravitation *(lire p. 30-34)*, constitue près de 85 % de la matière contenue dans l'Univers. Il est donc logique que dans cette histoire, ce soit très largement elle qui commande. Or, précisément parce que ses propriétés sont somme toute assez simplettes (elle ne fait rigoureusement rien d'autre que se condenser sous son propre poids), il est – toutes choses étant relatives – plutôt « facile » de simuler son comportement à grande échelle. Les résultats de ces modélisations informatiques indiquent qu'elle s'est condensée dans l'Univers en expansion, des halos de matière noire relativement petits s'agglutinant en structures de plus en plus grandes, formant ainsi une vaste toile cosmique, un réseau de nœuds et de filaments comparable à une sorte de réseau hydrographique en trois dimensions. On s'attend donc à ce que le glaçage de matière ordinaire qui saupoudre l'Univers – capable de chauffer, de briller, d'engendrer des réactions nucléaires, etc. – ait essentiellement suivi le mouvement, comme une écume de lumière entraînée sur les flots de la matière noire. Les recensements de galaxies établis par les astronomes au cours des dernières années confirment d'ailleurs que celles-ci se répartissent effectivement sur une telle toile cosmique.

CES PREMIERS SOLEILS AURAIENT BRILLÉ INTENSÉMENT ET BRÛLÉ LEUR CARBURANT À UNE VITESSE FOLLE… AVANT D'EXPLOSER EN SUPERNOVAE EXOTIQUES

Selon ce scénario « bottom-up », les premières étoiles se sont formées sporadiquement, çà et là, dans un Univers encore essentiellement dépourvu de grandes structures comme les galaxies ou les amas de galaxies. Des soleils qui devaient être de véritables monstres… De nos jours, les nuages de gaz qui s'effondrent pour former des étoiles contiennent des molécules, comme le monoxyde de carbone (CO), très efficaces pour rayonner dans l'infrarouge et évacuer la chaleur engendrée par la compression du gaz, facilitant ainsi leur effondre- ◆◆◆

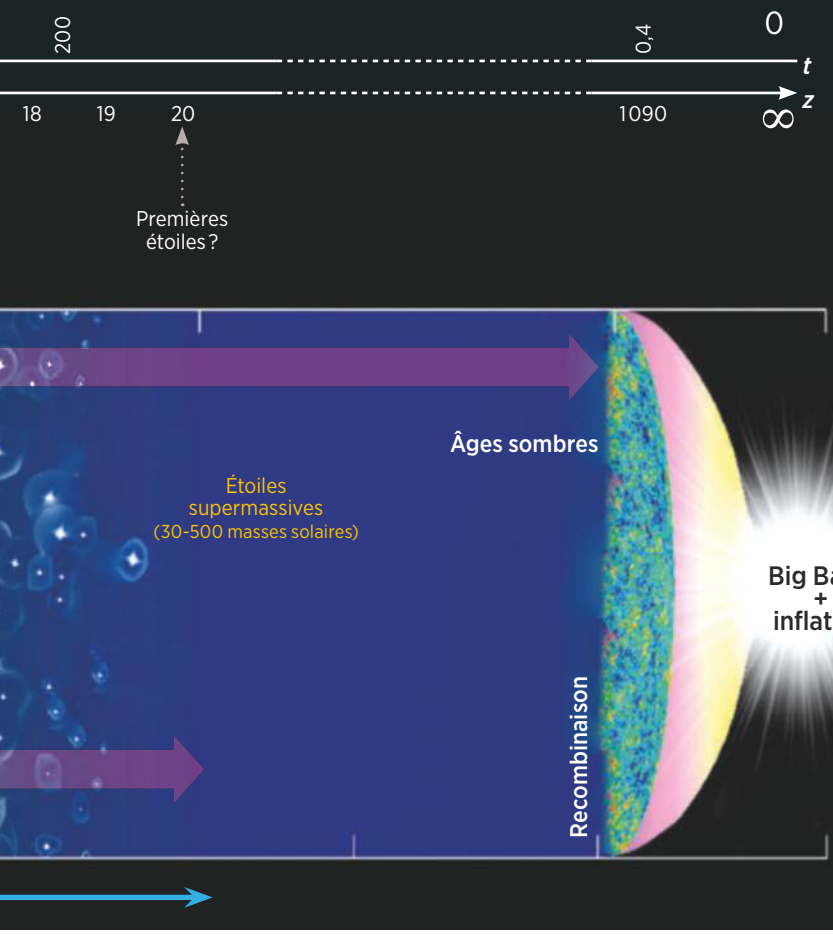


◆◆◆ ment ultérieur. Tel n'était pas le cas pour la première génération d'étoiles, à une époque où l'Univers ne contenait que de l'hydrogène et de l'hélium. En ce temps-là, seuls des « grumeaux » extrêmement massifs étaient susceptibles de s'effondrer, et il est donc plausible que ces premières étoiles aient eu des masses gigantesques – plusieurs dizaines, voire centaines de fois celle du Soleil. Ces premiers « soleils des cavernes », dont la taille, telle celle des ours et des lions de la préhistoire, n'est plus de ce monde, ont dû briller très intensément, brûler leur carburant à une vitesse folle et exploser en supernovae exotiques presque immédiatement à l'échelle cosmique… Avec un effet considérable sur le reste de la matière ordinaire.

Pour commencer, elles ont ensemencé l'Univers d'éléments plus lourds – notamment le carbone – forgés au cours de leur explosion, facilitant ainsi progressivement, grâce à la formation des molécules idoines, l'apparition d'étoiles de taille plus contemporaine. Ensuite, si les modèles indiquent que beaucoup de ces supernovae ont littéralement pulvérisé leur étoile progénitrice, certaines ont dû tout de même produire des trous noirs de masse intermédiaire qui seraient, peut-être, par fusions successives, les ancêtres des trous noirs supermassifs tapis aujourd'hui au centre des grandes galaxies. « *C'est l'hypothèse privilégiée, même si l'on comprend encore mal le détail de ces fusions*, explique Sandrine Codis. *Il se pourrait que des trous noirs primordiaux formés dès le Big Bang aient aussi joué un rôle.* »

Un univers trois à quatre fois plus petit et encombré qu'aujourd'hui

Finalement, l'intense rayonnement des premières étoiles et leur fin explosive ont dû émettre de gigantesques quantités de rayons X et d'ultraviolets qui ont échauffé, ionisé et dispersé le gaz froid qui les entourait. Les premiers trous noirs qu'elles ont engendrés ont également dû contribuer à l'émission de ces rayonnements ionisants : on sait en effet que ces astres, en principe invisibles, comptent parfois paradoxalement parmi les objets les plus brillants de l'Univers lorsqu'ils s'entourent d'un disque de gaz arraché à leur environnement – un disque dit « d'accrétion » – qui est échauffé à des températures colossales et émet de surcroît d'intenses jets de plasma le long de son



L'évolution de la matière ordinaire

En graduant le déroulé de l'histoire du cosmos à l'aide du décalage vers le rouge *z* subi par la lumière des objets lointains, les étapes primordiales de son évolution sont étirées, les époques récentes tassées. La phase d'expansion explosive (à t=0) correspond à une valeur de *z* infinie, et le présent, à un décalage *z* nul. L'accélération de l'expansion cosmique due à l'énergie sombre *(lire p. 36-39)* a commencé autour de *z* = 1.
Initialement empli d'un plasma (un gaz ionisé brûlant), l'Univers est entré dans son premier âge sombre après la « recombinaison », lorsque à *z* = 1 090, le plasma est devenu assez froid pour que les électrons soient capturés par les noyaux atomiques, formant un mélange d'hydrogène et d'hélium neutre et transparent. À partir de la première génération d'étoiles, des phénomènes violents réionisent progressivement ce gaz – renvoyé à l'état de noyaux et d'électrons dissociés –, bien que l'Univers reste transparent, son contenu ayant été considérablement dilué par l'expansion.
Le James-Webb va sonder cette période de formation des grandes structures de l'Univers. Le télescope Euclid explorera une région du ciel moins profonde mais plus large. Einstein *(lire p. 56-61)*, interféromètre européen prévu pour 2035, devrait scruter l'Univers âgé de moins d'un milliard d'années.

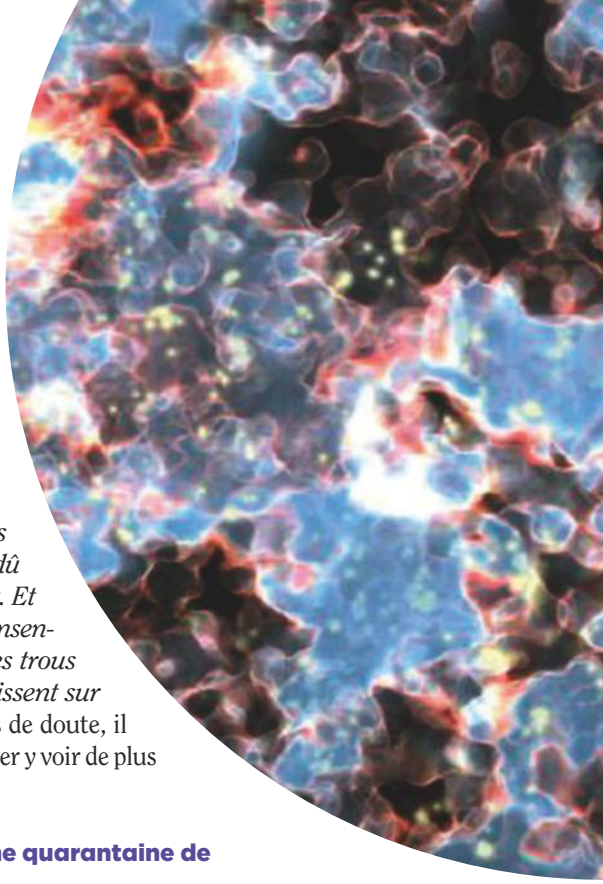
NOJ

axe de rotation. Cette activité violente enclenchée à partir de la première génération d'étoiles est attestée : en observant l'Univers lointain, et donc jeune, les astronomes constatent en effet qu'au cours du temps, une proportion de plus en plus grande du gaz qu'il contenait (essentiellement du dihydrogène, H_2) s'est retrouvé sous forme de plasma chaud ionisé. Un phénomène appelé réionisation, initié à la fin des Âges sombres et qui semble s'être achevé un peu avant que l'Univers ne fête son premier milliard d'années.

On comprend dès lors que toute simulation numérique du devenir de la matière ordinaire doive intégrer un nombre impressionnant de lois physiques… Non seulement celles de la gravité, mais aussi celles de la thermodynamique qui président à son échauffement puis à son éventuelle condensation, celles de la physique des plasmas qui régissent atmosphères stellaires et disques d'accrétion, celles de la physique nucléaire qui prédisent la synthèse des éléments lourds dans le cœur des étoiles. Sans oublier la relativité générale au voisinage des trous noirs… Bref, une fois qu'aux côtés de la matière noire entrent en jeu les talents autrement plus divers de la matière ordinaire, la situation devient inextricablement complexe ! Pas étonnant que les simulations peinent à suivre… *« Il faut bien se rendre compte*, continue Sandrine Codis, *que lorsque l'on parle de trous noirs ou de supernovae, on parle de phénomènes dont les répercussions sont globales, mais qui ont lieu à très, très petite échelle comparée à l'échelle cosmologique de nos simulations ! Les modèles n'ont tout simplement pas la précision suffisante pour les prendre correctement en compte. »*

CERTAINES SUPERNOVAE ONT PU PRODUIRE DES TROUS NOIRS DE MASSE INTERMÉDIAIRE QUI SERAIENT PEUT-ÊTRE, PAR FUSIONS SUCCESSIVES, LES ANCÊTRES DES MONSTRES TAPIS AU CENTRE DES GRANDES GALAXIES

Il n'est donc pas surprenant que restent dans l'ombre des pans entiers de l'histoire des grandes structures de l'Univers. Une histoire au cours de laquelle les étoiles ont dû se rassembler en galaxies naines, dont les rencontres et les fusions ultérieures – dans un Univers trois ou quatre fois plus « petit » et encombré qu'aujourd'hui – ont favorisé d'une part des flambées de naissances de jeunes étoiles chaudes, d'autre part la croissance de galaxies géantes, tandis que tout ce beau monde se rassemblait pour former les grands amas galactiques contemporains. Au cours du processus de fusion des galaxies, les trous noirs ◆◆◆



◆◆◆ qu'elles abritaient se sont agglomérés en trous noirs supermassifs qui ont constitué, au temps de leur folle jeunesse, autant de quasars, ou noyaux de galaxie actifs : des monstres dotés de disques d'accrétion gigantesques, cent mille milliards de fois plus brillants que le Soleil. Quelle est la contribution de chacun de ces phénomènes au réchauffement de la matière ordinaire dans le cosmos, et donc à la réionisation ? Personne n'est sûr de rien…

Ainsi, les premières galaxies naines, au sein desquelles la production de nouvelles étoiles était proportionnellement des centaines – voire des milliers – de fois plus frénétique que dans la Voie lactée contemporaine, pourraient avoir joué un rôle de premier plan dans cette période charnière de l'histoire de l'Univers. D'autant plus que, de taille « modeste », elles étaient encore relativement transparentes, permettant au rayonnement produit en leur sein de s'échapper et d'irradier leur environnement. Mais d'un autre côté, et pour les mêmes raisons, le gaz qu'elles contenaient a dû aussi être très vite soufflé vers l'extérieur, les privant de matière première pour former de nouvelles étoiles.

Pour que cette activité stellifère reprenne, il aurait alors fallu attendre que le gaz retombe le long des filaments de la toile cosmique vers des galaxies devenues géantes par fusions successives. *« C'est une des nombreuses choses que l'on aimerait bien savoir,* s'interroge Sandrine Codis. *Comment a évolué la fraction de gaz disponible au cours du temps ? De même, si l'on peut modéliser les flux de baryons* (protons, neutrons… *ndlr*) *le long des filaments cosmiques, on ne sait pas y introduire de la turbulence, alors qu'on est sûr qu'elle a dû jouer un rôle important. Et puis, il n'existe pas de consensus sur la façon dont les trous noirs centraux rétroagissent sur leur galaxie hôte. »* Pas de doute, il n'y a qu'une solution : aller y voir de plus près dans l'Univers réel.

CHANDRA X-RAY OBSERVATORY CENTER

Les Âges sombres se sont achevés dans la violence, avec l'explosion des premières étoiles qui ont émis des rayonnements ionisants, ouvrant la voie à l'ère de la réionisation. Sur cette visualisation, les régions ionisées figurent en bleu et transparent, les fronts d'ionisation en rouge et blanc, les régions neutres sont sombres.

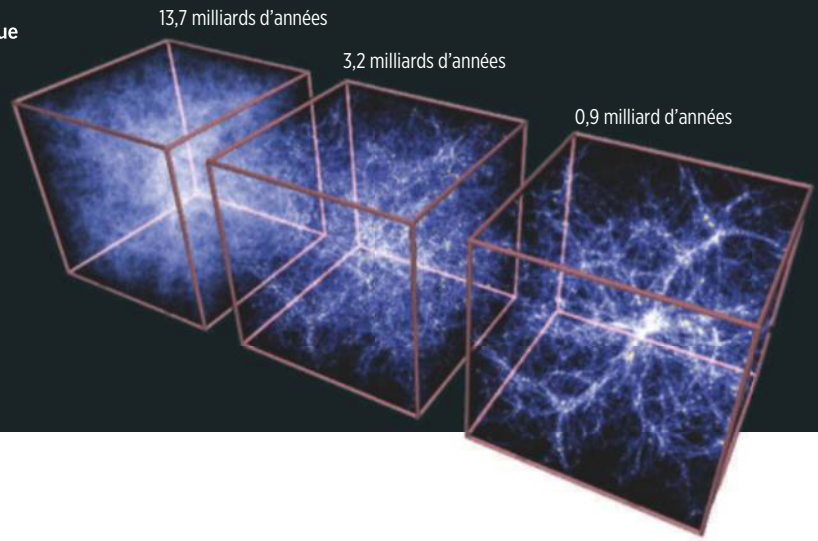
Une carte en 3D d'une quarantaine de millions de galaxies

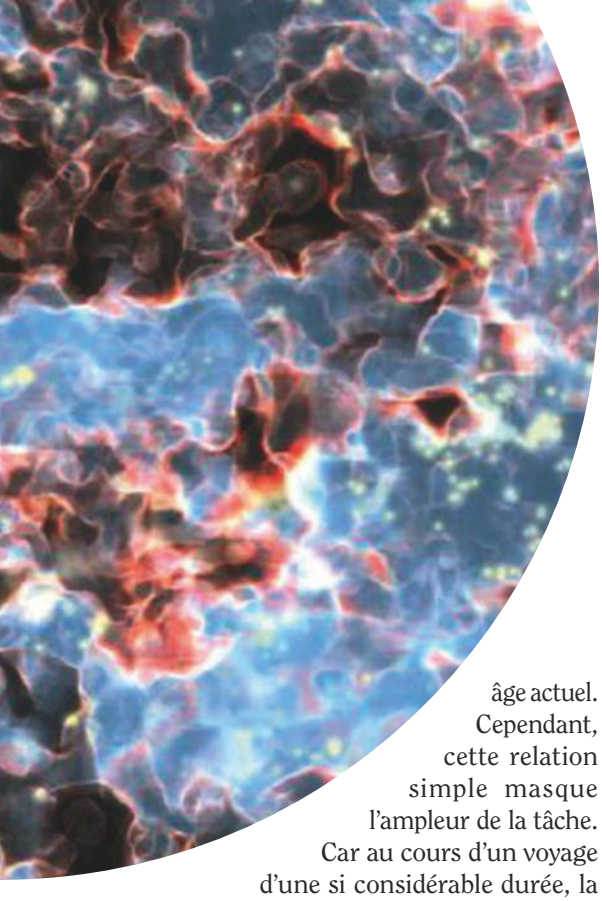
Tel est précisément l'objectif de missions comme Euclid, dont le lancement par l'Agence spatiale européenne (ESA) est prévu l'an prochain, ou du télescope spatial James-Webb, le plus grand jamais lancé, en décembre dernier : surprendre sur le vif la formation et l'évolution du contenu cosmique. Car nous le savons, regarder loin dans l'espace, c'est voir loin dans le passé. Des objets dont la lumière a mis, par exemple, dix milliards d'années à nous parvenir nous apparaissent tels qu'ils étaient lorsque l'Univers n'avait guère plus de trois milliards d'années, soit 20 % de son

Réseaux cosmiques

Les simulations informatiques montrent comment, à partir d'une répartition quasi uniforme 100 millions d'années après le Big Bang, la matière noire, qui constitue 85 % de la matière contenue dans l'Univers, s'est progressivement condensée pour former un réseau de filaments et de nœuds : la toile cosmique. Tout se passe comme si elle avait progressivement creusé des chenaux, des ruisseaux et fleuves se jetant dans des lacs – les nœuds du réseau qui correspondent aux grands amas de galaxies – le long desquels s'écoule la matière baryonique. Au sein de cette matière ordinaire se produisent, à très petite échelle, des phénomènes violents qui échauffent, ionisent et expulsent le gaz des galaxies et des amas, conduisant à une sorte « d'évaporation ».

Les grandes structures de l'Univers ont évolué progressivement depuis le Big Bang, l'uniformité des premiers millions d'années laissant place à la toile cosmique qui relie galaxies et amas.





SKA ORGANISATION/SWINBURNE ASTRONOMY PRODUCTIONS

âge actuel. Cependant, cette relation simple masque l'ampleur de la tâche. Car au cours d'un voyage d'une si considérable durée, la longueur d'onde de la lumière est étirée, comme toutes les autres distances dans l'Univers, et de façon significative. Cet effet de l'expansion cosmique, c'est le fameux décalage vers le rouge ou « redshift », habituellement noté *z*. Et ce facteur *z* constitue une bien meilleure échelle que les simples dates pour mesurer notre regard en arrière dans le temps *(lire aussi p. 22-23)*.

Un des objectifs principaux d'Euclid est de réaliser une carte en trois dimensions d'une quarantaine de millions de galaxies réparties sur une portion assez vaste de la voûte céleste, de la taille de la pleine Lune, mais dont les plus lointaines (et donc anciennes) ne se trouvent « que » vers $z = 2$ (leur lumière a été émise il y a un peu plus de 10 milliards d'années). *« C'est une mission complémentaire à celle du James-Webb »*, rappelle Sandrine Codis. Lui ne dispose pas de la largeur de vue d'Euclid, mais ira chercher à plus grande profondeur dans le ciel les toutes premières galaxies, et peut-être la première génération d'étoiles. Si elles ont dû se former à peine 30 % plus loin dans le temps, en termes de décalage vers le rouge, cela signifie que le James-Webb devra projeter son regard probablement un peu au-delà de… $z = 20$, doublant le record du télescope Hubble !

LE JAMES-WEBB IRA CHERCHER, PLUS LOIN QU'EUCLID, LES TOUTES PREMIÈRES GALAXIES ET LES PREMIÈRES GÉNÉRATIONS D'ÉTOILES

Ainsi, au cours de leur trajet, les longueurs d'onde observées auront été multipliées par plus de 20. Pour vous en faire une idée, lorsqu'ils nous parviennent d'une profondeur aussi vertigineuse, même les ultraviolets émis par les objets les plus brûlants du cosmos se trouvent étirés jusque dans l'infrarouge moyen. C'est la raison pour laquelle le fond du ciel apparaît noir à nos yeux, et c'est aussi la raison pour laquelle les caméras du James-Webb travaillent dans l'infrarouge (outre le fait que ces longueurs d'onde traversent mieux les nuages de poussière obstruant la ligne de visée).

Les résultats sont attendus avec impatience. Ces dernières années, par exemple, d'autres instruments comme le télescope spatial infrarouge Spitzer ou le réseau de radiotélescopes européen Alma ont détecté de nombreux objets étonnants : des galaxies émergeant de la réionisation déjà presque aussi massives que notre Voie lactée ; des galaxies plus modestes, nées très tôt, extrêmement riches en éléments lourds tel le carbone ; des trous noirs supermassifs si anciens qu'en bonne logique, ils ne devraient pas avoir eu le temps de croître depuis la première génération d'étoiles… Comme si, derrière le rideau de la nuit des temps, l'Univers avait mûri plus vite que prévu. La preuve que les modèles sont déficients ? Ou ne s'agit-il que d'un biais d'observation, d'exceptions qui ne sont pas représentatives du reste du cosmos, mais sont surreprésentées précisément parce qu'elles sont les plus faciles à détecter ? Euclid et James-Webb promettent d'en donner le cœur net, l'un en fournissant un échantillon d'objets profonds plus abondant, l'autre en sondant toute la période de formation des étoiles et des galaxies. Que peut-on espérer voir ? *« Surtout pas la confirmation de ce que l'on sait déjà ! »* s'exclame Sandrine Codis. *Le plus amusant serait que l'on découvre de nouveaux phénomènes qui nous indiquent les défauts de nos théories. »* Rendez-vous donc cet été, pour les premières images…

RENÉ CUILLIERIER

L'Univers insolite

La face cachée de la Terre

Et sous nos pieds, que se passe-t-il ? L'étude des ondes sismiques, qui changent de vitesse ou de direction à la jonction de couches de nature différente, révèle les interfaces croûte/manteau et manteau/noyau, et jusqu'à l'existence de la graine, à 5 150 kilomètres de profondeur. Cette boule d'environ 2 200 kilomètres de diamètre, essentiellement composée d'un alliage de fer et de nickel, est entourée d'un océan de fer en fusion de la même épaisseur. Brassé par de puissants mouvements de convection et animé par la rotation du globe, ce noyau produit le champ magnétique terrestre, indispensable à la vie puisqu'il dévie les particules de haute énergie du vent solaire et des rayons cosmiques. Au-dessus s'étend le manteau avec deux étranges formations rocheuses, épaisses de 1 000 kilomètres et larges de plusieurs milliers de kilomètres. Ces cryptocontinents, les Large Low Shear Velocity Provinces (LLSVP), seraient formés de roches denses. Le manteau recèlerait aussi d'immenses quantités d'eau, enfermées dans deux minéraux : la wadsleyite et la ringwoodite. Jusqu'à quatre fois le volume des océans ! Enfin, la croûte terrestre grouille de vie, avec des millions d'espèces différentes prospérant dans l'obscurité. Notre astre si familier recèle des mondes étonnants. F. F.

Révélations gravitationnelles

Il y a à peine six ans naissait une nouvelle astronomie, qui étudie les objets célestes grâce aux ondes émises lors de formidables collisions. Avec déjà des résultats inouis, comme la manière dont les étoiles forgent l'or…

Depuis son bureau qui domine la ville, sur fond de mer et de ciel bleu, Nelson Christensen est fier d'évoquer la nouveauté du moment : le troisième catalogue d'ondes gravitationnelles, fruit de la collaboration des observatoires européens et américains qui détectent ces minuscules oscillations de l'espace-temps, riche de 90 événements. Une petite moisson déjà, qui a bien grandi depuis la première observation du 14 septembre 2015. L'Américain, aujourd'hui directeur du laboratoire Artémis à l'Observatoire de la Côte d'Azur à Nice, a dû s'armer de patience entre sa thèse sur le sujet en 1983, sous la direction du prix Nobel Rainer Weiss, et ces premières confirmations par l'ob-

Coalescence simulée d'un trou noir et d'une étoile à neutrons. Déchirée par les intenses forces de marée du trou noir, celle-ci émet des flots d'ondes électromagnétiques… avant d'être avalée.

LIGO-CALTECH

servation : *« Ce fut une longue attente, puis en un jour, tout a changé ! »*

Il y a déjà plus d'un siècle qu'Einstein avait prédit l'existence des ondes gravitationnelles : d'après sa théorie de la relativité générale, toute masse qui subit une force crée une perturbation qui se propage à travers l'espace-temps. Une vague d'une hauteur cependant infime, au point que le physicien la jugea impossible à mesurer, même pour les objets les plus massifs. Ce qui fut effectivement le cas, jusqu'à la mise au point des interféromètres *(lire aussi p. 26-27)* aux bras plurikilométriques, capables de sentir le passage d'une onde haute d'un milliardième de milliardième de mètre (soit 10^{-18} mètre) ! L'observatoire américain Ligo (fort de deux antennes distantes de 3 000 kilomètres) et son homologue européen Virgo dans la campagne toscane se sont mis aux aguets dans les années 2000. Dès fin 2022, le japonais Kagra viendra leur prêter main-forte. Améliorés, les trois instruments attaqueront alors la quatrième campagne de détection d'ondes gravitationnelles (O4). *« On s'attend à deux ou trois détections par semaine, au lieu d'une en moyenne actuellement »,* estime Nelson Christensen.

Deux secondes après la monstrueuse collision, un flash de rayons gamma

En attendant ce jour, il y a de quoi faire ! Car chacune des 90 ondes gravitationnelles répertoriées raconte une histoire : celle de deux astres compacts – en général deux trous noirs, rarement une étoile à neutrons – pris dans le champ gravitationnel l'un de l'autre et qui décrivent des spirales de plus en plus serrées avant de finir par fusionner en formant un troisième, tout en faisant vibrer l'espace-temps. Mais pour chaque onde détectée, la succession des événements entre ces deux moments doit être reconstituée. Elle est cruciale pour comprendre la diversité des astres et les mécanismes en œuvre.

Parmi ces presque cent détections, quelques-unes relèvent d'événements extraordinaires. Le plus célèbre d'entre eux, baptisé GW170817 (pour Gravitational Wave du 17 août 2017), s'est déroulé à 133 millions d'années-lumière de la Voie lactée, au sein de la galaxie NGC 4993, lorsque deux astres ont fusionné. Vu leurs masses respectives, 1,2 et 1,6 fois celle du Soleil, ils semblaient relever de la catégorie des « étoiles à neutrons ». Une aubaine ! Car, contrairement à la fusion de deux trous noirs qui n'émet que des ondes gravitationnelles, les étoiles à neutrons peuvent perdre une partie de leur matière avant le stade final et émettre également des ondes électromagnétiques. Ce qui fut le cas ! Deux secondes après la détection des premières ondes gravitationnelles émises par la monstrueuse collision, deux télescopes enregistraient un flash de rayons gamma – un de ces mystérieux signaux appelés sursauts gamma courts. Au cours de ce gigan- ◆◆◆

LEXIQUE

Un trou noir est le stade ultime d'évolution des étoiles massives. Il s'agit d'un astre si compact qu'il développe un champ gravitationnel extrême, ne laissant échapper ni matière ni lumière.

Une étoile à neutrons est issue d'une série d'effondrements gravitationnels d'une étoile qui a épuisé son combustible nucléaire. C'est un astre dense qui n'est constitué que de neutrons, particules nucléaires.

Une naine blanche est le stade ultime d'évolution d'une étoile de masse modérée. Notre Soleil finira en naine blanche.

Une céphéide est une étoile pulsant à cause des contractions et des dilatations du gaz qui la compose : sa luminosité varie donc à un rythme très régulier. Au début du XX^{e} siècle, l'astronome américaine Henrietta Leavitt a découvert que le rythme de pulsation dépend de la luminosité intrinsèque de l'étoile. Connaissant celle-ci et la luminosité apparente, la vraie distance des céphéides peut être déterminée. Une aubaine pour les astrophysiciens, qui l'utilisent comme jalon dans l'espace.

CARLETON COLLEGE

« AVEC LA QUATRIÈME CAMPAGNE DE DÉTECTION, ON S'ATTEND À REPÉRER DEUX OU TROIS ÉVÉNEMENTS PAR SEMAINE, AU LIEU D'UN, EN MOYENNE, ACTUELLEMENT »

Nelson Christensen, directeur du laboratoire Artémis à l'Observatoire de la Côte d'Azur, Nice

◆◆◆ tesque feu d'artifice se déclenchaient des réactions nucléaires, qui forgeaient des éléments chimiques lourds, comme l'or, le platine ou l'argent, dont on ignorait jusque-là la genèse. Et les astronomes n'étaient pas au bout de leurs surprises. Les jours suivants, pas moins de 70 observatoires ont pointé vers la région du ciel d'où provenaient ces signaux. À l'emplacement de la collision, le flash gamma est passé à l'ultraviolet, puis au bleu, rouge et enfin aux ondes radio… Un spectre très caractéristique, considéré désormais comme une signature de la collision de deux étoiles à neutrons.

Happée directement par le trou noir, sans se déchiqueter

À lui seul, GW170817 a donc apporté une foule d'informations : il a permis d'expliquer l'origine des éléments lourds de l'Univers, fourni une signature de ces collisions et offert une manière de déterminer directement la distance d'un astre : car l'onde gravitationnelle se déplace à la vitesse de la lumière ; le trou noir n'émettant aucune lumière, le temps d'arrivée de cette onde indique précisément la distance de l'astre. Cette méthode excite particulièrement les cosmologistes : elle leur permettra de trancher l'épineuse question de l'expansion de l'Univers *(lire l'interview p. 61)*.

Après ce jour béni du 17 août 2017, chacun espérait voir se reproduire un tel événement, détectable à la fois par ondes gravitationnelles et électromagnétiques. Las, GW170817 reste unique ! *« Il était exceptionnel à plusieurs titres*, explique Astrid Lamberts, récemment recrutée au Laboratoire d'astronomie Lagrange de l'Observatoire de la Côte d'Azur. *À cause de* la *configuration entre les deux astres d'abord : ils étaient probablement situés dans le même plan, ce qui fait qu'ils ont été déchiquetés à cause des intenses forces de marée qui les liaient. Cette matière a émis des flots d'ondes électromagnétiques. Et l'événement a eu lieu assez près pour être facilement détectable… »*

LIGO-MIT-CALTECH/SPL/SUCRE SALÉ

Des techniciens réalisent des essais sur l'un des miroirs de l'interféromètre Ligo, aux États-Unis. Pour pouvoir détecter les infimes déviations de l'espace-temps causées par les ondes gravitationnelles, les miroirs doivent être les plus parfaits possibles : verre le plus pur au monde, polissage au niveau atomique, revêtement ultraréfléchissant.

Mais les astronomes ont appris à utiliser d'autres ficelles pour faire « parler » les événements extraordinaires du dernier catalogue. À l'exemple des deux collisions survenues le 5 et le 15 janvier 2020, enregistrées par Virgo et Ligo, et dénichées au beau milieu de l'été dans la masse des données par l'astrophysicienne encore émue. « *Toutes les deux correspondent à un cas très particulier, une première : la fusion d'une étoile à neutrons et d'un trou noir !* », raconte la chercheuse. L'analyse minutieuse des données enregistrées pendant les quelques secondes qu'a duré l'événement a révélé que la collision du 5 janvier était due à deux astres situés à 900 millions d'années-lumière de la Terre, l'un de 1,9 masse solaire pour un rayon d'environ 10 kilomètres, et l'autre de 8,9 fois la masse solaire. Pour GW200115, 1,5 et 5,7 fois la masse solaire. À chaque fois, les caractéristiques correspondent à une étoile à neutrons et un trou noir. Elles expliquent pourquoi aucun flash lumineux n'a été perçu : « *Les différences de masse sont telles que l'étoile à neutrons a été très probablement happée directement par le trou noir, sans se déchiqueter.* »

D'autres rencontres sortent du rang à cause de la masse des astres qu'elles mettent en jeu,

CHRISTOPHE MARCADÉ

« LISA SERA CAPABLE DE CAPTER LE SIGNAL DE DEUX NAINES BLANCHES EN ROTATION DONT LA COLLISION AURA LIEU DANS DES MILLIONS D'ANNÉES »

Astrid Lamberts, astrophysicienne au laboratoire d'astronomie Lagrange, Observatoire de la Côte d'Azur

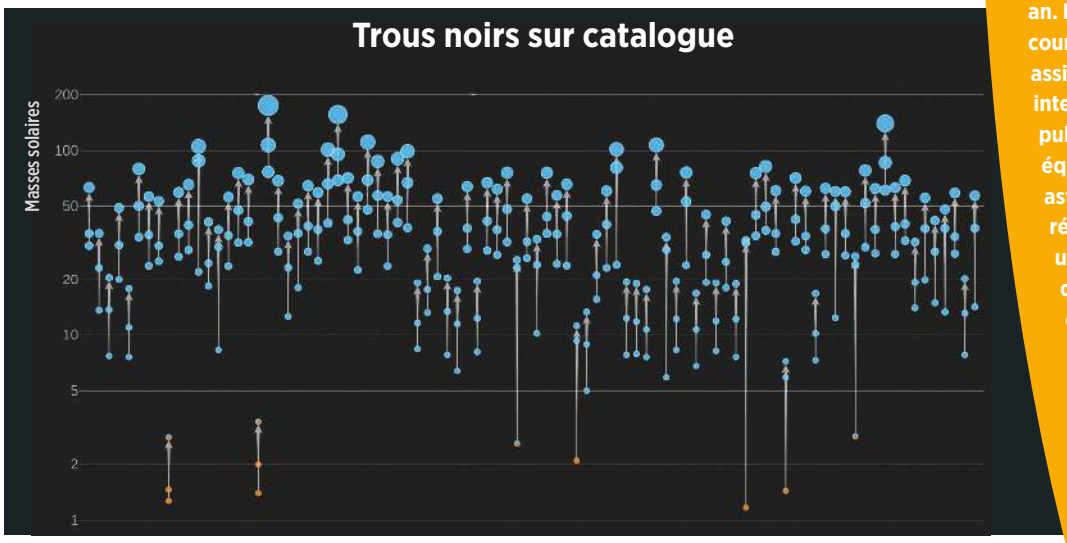
comme GW190521 : deux trous noirs géants, 85 et 66 fois la masse du Soleil, ont fusionné pour former un trou noir de 142 fois la masse solaire, soit un « trou noir intermédiaire » dont très peu d'exemplaires ont été jusque-là découverts et dont la formation est encore un casse-tête. GW0190521 apporte peut-être une explication : ils pourraient être le fruit de la collision de deux gros trous noirs stellaires.

Toutes les 15 minutes, la Terre est secouée par une onde gravitationnelle

Ces événements extraordinaires offrent la possibilité – inimaginable il y a à peine cinq ans – d'avancer quelques statistiques : tout d'abord, toutes les 15 minutes, la Terre se trouve secouée par une onde gravitationnelle due à la collision de deux trous noirs ! De plus, les équipes sont déjà capables d'estimer qu'au sein d'un cube de 3,26 milliards d'années-lumière de côté a lieu, chaque année, une trentaine de collisions entre deux trous noirs. En ce qui concerne les couples mixtes « trou noir-étoile à neutrons », c'est trois fois plus, et presque trente fois plus d'« étoile à neutrons-étoile à neutrons ». Une grande partie de ces évènements ne seront pas détectés : trop éloignés, trop légers, au-delà de la sensibilité des détecteurs actuels…
Certains astres ne fusionneront que dans des millions d'années, tant ils sont distants l'un de l'autre, alors même que leur danse gravitationnelle a déjà commencé. Leur lent rapprochement pourra être repéré depuis l'espace par Lisa à partir de 2037. Ce projet phare de l'Agence spatiale européenne (ESA) s'appuiera sur trois satellites positionnés aux sommets d'un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté, parcouru par des faisceaux laser. Il sera capable de détecter des ondes gravitationnelles très larges (300 millions de kilomètres de longueur d'onde, soit à la fréquence du mHz). *« Ce sera par exemple le signal émis par deux naines blanches en rotation, dont la collision ne surviendra que dans des millions d'années,* précise Astrid Lamberts. *Rien que dans notre galaxie, on estime qu'il existe 10 000 couples de ce type. »* Autre phénomène détectable par Lisa : la collision de trous noirs surpermassifs…

Einstein et la troisième génération de détecteurs terrestres

En attendant la prochaine décennie et l'aventure spatiale, l'essentiel de l'astronomie gravitationnelle aura lieu sur le plancher des vaches. Pour commencer, fin 2022, les deux observatoires existants, à savoir les deux antennes de Ligo et Virgo, vont voir leur sensibilité augmen- ◆◆◆



LIGO-VIRGO/F. ELASKY, A. GELLER, NORTHWESTERN

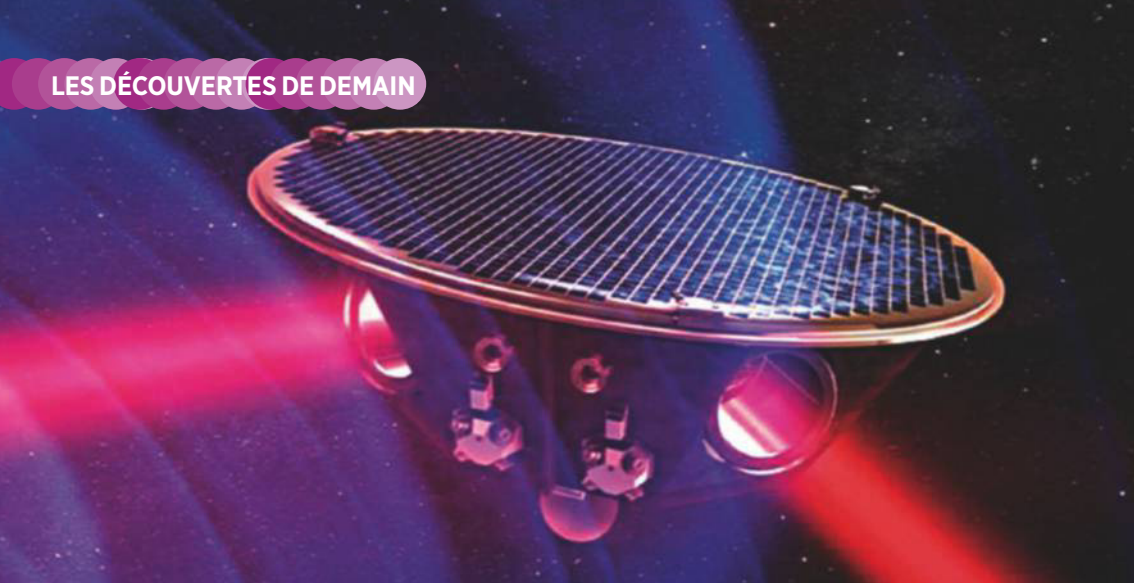
Le troisième catalogue d'ondes gravitationnelles répertorie 90 événements. Chaque disque coloré représente un astre compact. De la fusion de deux trous noirs (en bleu) résulte un troisième de masse plus importante (en haut de chaque flèche). Quelques étoiles à neutrons (en orange) fusionnent elles aussi pour former un astre à l'identité incertaine (bicolore). Le plus massif des trous noirs ainsi formés atteint 180 masses solaires, le plus léger, 6 à 7.

L'Univers insolite

Le réseau routier interplanétaire

Un puissant réseau de courants gravitationnels, baptisé Interplanetary Transport Network (ITN), lie les points de Lagrange formés entre le Soleil, les planètes et leurs satellites. Les points de Lagrange sont des points d'équilibre où les forces gravitationnelles s'annihilent : lorsque deux corps massifs sont en rotation l'un autour de l'autre, à l'instar de la Terre et du Soleil, leurs champs de gravité fournissent cinq points d'équilibre à un troisième petit corps, comme une comète. Selon les positions des planètes et de leurs satellites, des trajectoires optimales se dessinent entre leurs points de Lagrange, permettant à de petits objets de se mouvoir sans dépenser d'énergie. Un objet qui en emprunterait un pourrait parcourir plus de 150 millions de kilomètres par an. Découverts en 1970, ces courants de gravité ont été assimilés à des autoroutes interplanétaires. Une étude publiée fin 2020 par une équipe de l'Observatoire astronomique de Belgrade révèle qu'ils sont reliés en une série d'arcs s'étendant de la Ceinture principale d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter, jusqu'au-delà d'Uranus. Ces corridors gravitationnels permettent de comprendre la trajectoire parfois erratique des comètes et astéroïdes.

F. F.



Le projet spatial Lisa s'appuiera sur trois satellites comme celui-ci, positionnés en un triangle de 2,5 millions de kilomètres de côté parcouru de faisceaux laser pour piéger les ondes gravitationnelles de basse fréquence. Vue d'artiste.

MAX PLANCK INSTITUTE FOR GRAVITATIONAL PHYSICS, MILDE MARKETING SCIENCE COMMUNICATION, EXOZET, SIMULATION: C. HENZE (NASA)

◆◆◆ tée : le double pour Virgo et 1,5 fois plus pour Ligo. Avec ce projet Advanced Virgo +, *« le détecteur européen pourra voir deux fois plus loin, ce qui se traduit par l'exploration d'un volume de l'Univers huit fois plus important »*, précise Nelson Christensen.

« Dans une dizaine d'années, nous serons probablement au bout des améliorations techniques que nous pourrons effectuer pour Ligo et Virgo. Pour exploiter davantage le potentiel de l'astronomie gravitationnelle, il faudra passer à la troisième génération de détecteurs terrestres », projette Matteo Barsuglia du laboratoire Astroparticules et Cosmologie. La suite ? La bonne nouvelle porte le nom d'Einstein Telescope. L'ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructure), qui détermine les infrastructures de recherche stratégiques pour l'Europe, l'a intégré l'été dernier à ses priorités. *« L'objectif est d'obtenir une sensibilité dix fois plus importante que Ligo et Virgo, et aussi d'élargir la sensibilité de l'instrument à basse fréquence, jusqu'à quelques hertz »,* annonce Matteo Barsuglia, qui est le coordinateur scientifique français de l'instrument ainsi que de Virgo. De quoi observer les fusions de trous noirs à toutes les époques de l'histoire de l'Univers et atteindre les événements ayant eu lieu lorsque l'Univers était à peine âgé de quelques centaines de millions d'années. À l'époque, selon les modèles cosmologiques, aucune des étoiles de l'Univers n'était formée, mais certaines théories envisagent l'existence de trous noirs primordiaux. Peut-être leur fusion générera-t-elle des ondes gravitationnelles à la portée d'Einstein Telescope ?

Pour l'heure, l'enjeu relève de la géopolitique européenne : deux sites sont proposés, la Sardaigne, et une zone proche de Maastricht, aux confins de la Belgique, des Pays-Bas et de l'Allemagne. Trois bras longs de 10 kilomètres formant un triangle équilatéral y seront enfouis à quelques centaines de mètres de profondeur pour être à l'abri des bruits sismiques. Avec de nombreuses innovations : par exemple, chaque bras, maintenu à deux températures différentes, observera pour la première fois à deux fréquences distinctes. Un challenge, en à peine douze ans, car le fonctionnement de l'Einstein Telescope est prévu à l'horizon 2035. En attendant, outre-Atlantique, on ne reste pas les bras croisés : le projet Cosmic Explorer est conçu dans la continuité des détecteurs actuels – en surface – mais doté de deux bras de 20 kilomètres chacun, qui vont s'étendre dans le désert de l'Utah à l'horizon 2040. Les deux infrastructures géantes déverseront des flots de données à analyser. Les plus jeunes chercheurs se frottent les mains : ce sont eux qui auront le privilège de piloter le *nec plus ultra* des installations de cette nouvelle astronomie. C'est en quelque sorte la part la plus secrète du ciel qui leur appartient déjà.

AZAR KHALATBARI

Kilonova : la faiseuse d'or

Depuis l'onde gravitationnelle du 17 août 2017, GW170817, un nouveau terme est venu enrichir le vocabulaire des astrophysiciens : kilonova. Il s'agit d'un phénomène qui se produit lors de la collision de deux étoiles à neutrons ou d'un couple « étoile à neutrons-trou noir ». Le choc déclenche des réactions nucléaires au cours desquelles des neutrons sont rapidement capturés (d'où leur nom de processus R, pour « rapide »), donnant lieu à la formation d'éléments chimiques très lourds comme l'or, l'argent…

Quelques secondes après l'onde gravitationnelle est survenu le sursaut gamma : l'étoile a été déchiquetée et les ions lourds se sont désintégrés, émettant un rayonnement gamma, un sursaut gamma court, qui a pris le nom de GRB 170817A (GRB pour Gamma Ray Burst). La kilonova a été désignée par l'Union astronomique internationale par le code « AT 2017 gfo », premier du genre.

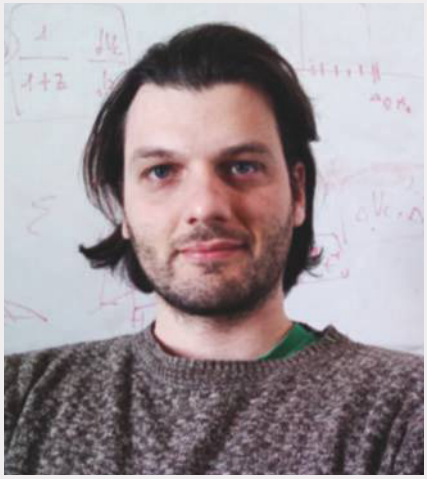
SIMONE MASTROGIOVANNI
Astrophysicien, laboratoire Artémis, Observatoire de la Côte d'Azur

« Nous avons la méthode, il nous faut les données ! »

Cherchant à déterminer le taux d'expansion de l'Univers, indispensable pour en estimer l'âge et l'avenir, les cosmologistes obtiennent deux valeurs irréconciliables. Les ondes gravitationnelles pourraient apporter la réponse.

Comment détermine-t-on le taux d'expansion de l'Univers ?
Ce taux, aussi appelé constante de Hubble – noté H_0 – détermine la vitesse à laquelle gonfle chaque mégaparsec (Mpc) d'Univers : un mégaparsec correspond à 3,26 milliards d'années-lumière. Cette constante s'exprime en kilomètres par seconde et par Mpc. Pour la calculer, il faut connaître à la fois la distance d'un astre et la vitesse à laquelle il « semble » s'éloigner du fait de l'expansion de l'espace. La distance est très difficile à déterminer, car nul ne connaît la luminosité intrinsèque d'un astre : ce n'est pas parce qu'il nous paraît très peu lumineux qu'il est très lointain. Il faut s'aider de méthodes indirectes. Quant à la vitesse d'éloignement, elle est donnée par le décalage vers le rouge : lorsqu'une source lumineuse s'éloigne de l'observateur, sa lumière est décalée vers les grandes longueurs d'onde (le rouge dans le spectre visible).

Quelle est sa valeur aujourd'hui ?
Les cosmologistes obtiennent des valeurs différentes selon les observations. L'étude du fond diffus cosmologique – cette première lumière de l'Univers, scrutée notamment par le satellite européen Planck – donne une valeur de 67 km/s par Mpc avec une incertitude de mesure de 0,5 km/s par Mpc. Tandis que les observations à partir d'étoiles comme les céphéides *(lire le lexique p. 57)*, dont on connaît les distances, aboutissent à 72 ! Ces deux valeurs semblent irréconciliables. Cela pourrait signifier que l'Univers n'est pas en expansion comme prévu, et que nous avons peut-être besoin d'une nouvelle physique ! Cela bouleverserait les connaissances actuelles. Mais avant d'en arriver là, il nous faut être sûr des mesures de H_0.


S. MASTROGIOVANNI

Qu'apporteront les ondes gravitationnelles ?
Elles fournissent une troisième méthode qui pourrait résoudre ce désaccord. L'idéal serait d'observer des signaux comme GW170817, avec une onde gravitationnelle et sa contrepartie électromagnétique. L'onde gravitationnelle permet en effet de déterminer directement la distance à laquelle est survenue la collision, et la contrepartie électromagnétique, la vitesse à laquelle l'astre nouvellement formé s'éloigne du fait de l'expansion.

Hélas, nous n'avons vu qu'un seul événement de ce type. En attendant d'autres exemplaires, nous avons développé deux méthodes : utiliser les propriétés des trous noirs et exploiter les catalogues de galaxies. La première consiste à tirer profit du fait que le processus même de formation d'un trou noir lui attribue une masse caractéristique. Et cette masse se trouve affectée par le décalage vers le rouge. Par ailleurs, comme l'onde gravitationnelle nous fournit directement la distance, nous avons donc les deux informations pour déduire H_0. L'autre possibilité est de se baser sur les catalogues de galaxies, comme Glade +, qui donne le décalage vers le rouge de millions de galaxies. Nous y situons les deux trous noirs qui ont été à l'origine de l'onde gravitationnelle et nous nous basons sur le décalage vers le rouge de ces galaxies. La distance, là aussi, est directement donnée par l'onde gravitationnelle.

Quelle valeur obtenez-vous ainsi ?
Nos méthodes donnent un H_0= 68 + ou - 6-8 km/s/Mpc… Nous ne sommes pas encore en mesure de départager entre les valeurs discordantes, mais nous espérons pouvoir y parvenir dès que nous aurons accumulé un grand nombre d'événements. Nous avons la méthode, il nous faut les données.

PROPOS RECUEILLIS PAR A. KH.

LA VIE AILLEURS

MARC BOUJAY/OSSIMA PRODUCTIONS/NATURAGENCY

Créatures extraterrestres imaginées par l'artiste Marc Boulay.

Parmi les grandes questions qui dépassent le petit monde de la cosmologie figure celle de l'existence d'une vie, quelle qu'en soit la forme, ailleurs que sur Terre. Si d'éventuelles civilisations extraterrestres n'ont toujours pas révélé leur présence, des traces d'une chimie prébiotique ont déjà été repérées dans notre système solaire, qu'il s'agisse de molécules organiques, de nappes d'eau liquide ou de glace. Et cette quête existentielle se poursuit désormais en direction d'exoplanètes justement qualifiées d'habitables. À suivre…

Dès l'an prochain, sondes, rovers et télescope géant vont scruter comme jamais notre coin d'Univers, des lunes de Jupiter et Saturne à notre propre satellite… Révélations en vue !

La face cachée du Système solaire

Des océans sous la glace

Et si les lunes glacées des régions périphériques étaient les meilleures cibles pour la recherche d'autres formes de vie dans le Système solaire ? L'hypothèse est fortement débattue dans la communauté scientifique depuis la découverte de gigantesques océans cachés sous la surface de plusieurs satellites de Jupiter et de Saturne : Europe, Ganymède et Callisto, Titan et Encelade, tous se sont avérés abriter dans leurs profondeurs de vastes réservoirs d'eau à l'état liquide. Une surprise pour les planétologues qui ont décidé de consacrer à l'étude de ces astres plusieurs missions spatiales dont la prochaine, conçue par l'Europe, partira au début de l'année prochaine. Avec un espoir : mettre au jour des indices à même de livrer la composition de ces « mers » intérieures.

Un volume deux fois supérieur à celui de toutes les eaux terrestres réunies

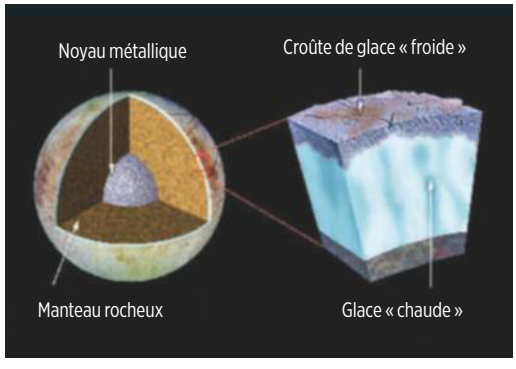
Ingrédient indispensable à la vie, l'eau est une molécule plutôt abondante dans l'Univers. En revanche, il est rare d'en trouver sous forme liquide. Dans le Système solaire, seules Mars et peut-être Vénus semblent avoir connu des périodes humides. Soit qu'ils orbitent au plus près de notre étoile et sont donc trop chauds, comme Mercure, soit qu'ils progressent, au-delà de la Ceinture d'astéroïdes, dans des régions froides faiblement éclairées par le Soleil, les autres corps n'ont ni fleuves, ni rivières…

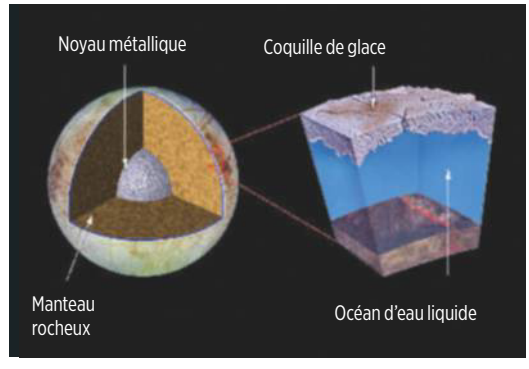
Gros plan sur Europe, l'une des quatre lunes de Jupiter. Sur cette image prise par la sonde Galileo, les lignes sombres indiquent des failles dans la croûte glacée, preuve de l'existence de mouvements internes à l'astre.

Du moins, est-ce ce que pensaient les astronomes jusqu'au passage des sondes Voyager 1 et Voyager 2 à proximité de Jupiter, en 1979. Les chercheurs découvrent alors Europe, une lune entièrement recouverte de glaces, dont la surface ultra-lisse, peu pourvue en cratères, leur semble étonnamment jeune : quelques dizaines de millions d'années, tout au plus. Soit bien peu au regard de l'âge « canonique » du Système solaire : 4,5 milliards d'années ! Ils observent également d'innombrables craquelures et rayures qui semblent indiquer que le comportement de la croûte est proche de celui d'une banquise… et donc qu'il existe une activité tectonique. Étrange. Celle-ci ne peut être provoquée par une dérive de continents, puisqu'Europe n'en possède pas. Il s'agirait donc de mouvements initiés à des niveaux inférieurs, qui seraient par conséquent constitués de glaces déformables ou… d'eau à l'état liquide ! Se pourrait-il que la lointaine Europe, astre privé d'atmosphère et dont les températures de surface frôlent les -150 °C, possède une « mer souterraine » ?

Les scientifiques vont devoir attendre 1995 et le début de la mission Galileo pour connaître la réponse. Depuis son orbite autour de Jupiter, la sonde de la Nasa mesure le ◆◆◆

NASA/SPL/SUCRÉSALÉ





JPL/NASA

La structure interne d'Europe fait encore l'objet de spéculations. S'agit-il d'une épaisse couche de glace plus chaude que celle qui constitue la surface, ou d'un océan liquide ? Le survol de la planète par les sondes Juice et Europa Clipper permettra, d'ici dix ans, de trancher.

◆◆◆ puissant champ magnétique de la géante gazeuse. Et détecte à chaque survol d'Europe de curieuses variations du signal. Seule explication plausible : la présence d'une couche conductrice d'eau salée à quelques dizaines de kilomètres sous la croûte : un océan. Et quel océan ! Couvrant la totalité du corps céleste, il atteint des profondeurs de 100 à 150 kilomètres, totalise un volume deux fois supérieur à celui de toutes les eaux terrestres réunies, et pourrait même parfois se vider d'une partie de son contenu en surface. C'est du moins ce que laissent envisager les dépôts de sel observés en périphérie des failles dont la croûte est striée, ainsi que certaines zones circulaires et elliptiques peut-être créées par des remontées de glaces et des émissions sporadiques de vapeur d'eau.

Des effets de marée provoqués par l'énorme gravité de Jupiter

Depuis, deux autres de ces nappes marines ont été mises au jour dans le système jovien. Une première sur Callisto. Et une seconde sur Ganymède, grâce au télescope spatial Hubble, par l'observation des oscillations des aurores boréales qui se forment parfois au-dessus des pôles de cette lune, la seule du Système solaire à posséder son propre champ magnétique. Mais, enfouis à des profondeurs bien plus importantes – de l'ordre de 100 à 150 kilomètres –, ces océans, contrairement à celui d'Europe, n'ont pas remodelé la surface de leur astre à des périodes récentes : les images de Galileo montrent des terrains âgés de plus d'un milliard d'années, creusés de nombreux cratères…

Comment de l'eau peut-elle se maintenir sous forme liquide à de pareilles distances du Soleil ? L'explication tient à la taille de ces lunes. *« Europe, Ganymède, Callisto et Titan sont des objets massifs. Le diamètre du plus petit est proche de celui de la Lune, celui du plus gros dépasse celui de Mercure,* explique Gabriel Tobie, directeur de recherche CNRS au laboratoire Planétologie et Géosciences à Nantes. *Des corps de cette importance possèdent un cœur constitué d'un manteau rocheux riche en éléments radioactifs. En se désintégrant, ces derniers fournissent l'énergie – et donc la chaleur – nécessaire au maintien de l'eau à l'état liquide à des profondeurs de quelques dizaines de kilomètres. »* À cela s'ajouteraient, pour Europe, les effets de marée provoqués par l'énorme gravité de Jupiter. Ceux-ci créeraient des frictions dans la glace, générant un surplus de chaleur qui maintiendrait la zone aqueuse beaucoup plus près de la surface.

Par ailleurs, l'océan de Ganymède – comme celui de la lune Titan de Saturne – est pris entre deux couches de glace. Il n'est pas directement en contact avec le socle rocheux. Ce phénomène serait simplement dû à sa plus forte

De puissants jets de vapeur et de grains de glace percent la surface d'Encelade, projetant des sels minéraux, des molécules organiques et des poussières de silice jusqu'aux anneaux de Saturne, dont ce petit corps est un satellite.

G. TOBIE

« EN SE DÉSINTÉGRANT, LES ÉLÉMENTS RADIOACTIFS DU MANTEAU FOURNISSENT L'ÉNERGIE – ET DONC LA CHALEUR – NÉCESSAIRE AU MAINTIEN DE L'EAU À L'ÉTAT LIQUIDE »

Gabriel Tobie, directeur de recherche CNRS au laboratoire Planétologie et Géosciences à Nantes

RON MILLER/SPL/SUCRE SALÉ

proportion en glaces. Mis sous pression par le poids des énormes couches de glace qu'il supporte, son océan souterrain serait maintenu dans des conditions physico-chimiques telles qu'il pourrait se solidifier en un type de glace plus dense que l'eau liquide. En s'accumulant sur les fonds sans pour autant remplir le réservoir, ces dernières auraient fini par prendre les zones aqueuses en sandwich…

Des molécules organiques dans des jets de centaines de kilomètres de hauteur

Tout se résumerait donc à une question de taille. Un corps céleste suffisamment gros et contenant beaucoup de glace aurait toutes les chances d'abriter de vastes quantités d'eau liquide. Mais dans ce cas, comment expliquer l'océan d'Encelade ? Ce petit satellite de Saturne – 500 kilomètres de diamètre à peine – a stupéfié les astronomes au moment de la mission Cassini. En effet, dès son arrivée sur place en 2005, la sonde de la Nasa a observé un énorme panache de vapeur d'eau et de grains de glace jaillissant de grandes fractures repérées au niveau du pôle sud. De plusieurs centaines de kilomètres de hauteur, ces jets – dans lesquels Cassini détecte des sels, des molécules organiques et des poussières de silice – projettent des particules dont certaines, mises en orbite, atteignent l'un des anneaux de Saturne (l'anneau E), d'autres retombant sur la surface brillante et glacée d'Encelade sous forme d'une fine neige poudreuse. Et cela, depuis au moins dix millions d'années, comme l'établiront les chercheurs en estimant l'épaisseur des dépôts. Quel peut être le mécanisme à l'origine de ce fantastique phénomène ?

Le noyau poreux du petit corps est une véritable éponge

Gabriel Tobie et ses collègues le découvriront bientôt. En analysant la topographie, le champ de gravité et les modulations de l'axe de rotation de cette lune, ils parviennent à démontrer l'existence, là aussi, d'un océan interne. Abrité sous deux à six kilomètres de glace au niveau du pôle sud, sous 30 à 40 kilomètres à l'équateur, ce dernier serait profond d'une soixantaine de kilomètres et occuperait pas moins de la moitié du volume total d'Encelade ! Comment cet astre minuscule peut-il conserver de telles quantités d'eau liquide ? L'équipe invoque les forces de marée exercées par Saturne. Celles-ci auraient fini par faire du noyau poreux du petit corps une véritable éponge où de l'eau circule en permanence. Ce lessivage des roches favoriserait des réactions chimiques et produirait des courants d'eau chaude ascendants, qui entretiendraient à la surface du socle rocheux une activité hydrothermale comparable à celle observée au niveau des dorsales océaniques terrestres. En amincissant et en fragilisant la croûte de glace au niveau du pôle sud, celle-ci serait directement responsable des jets de vapeur et de grains de glace décrits par Cassini… Environnements aqueux, sources d'énergie… les lunes glacées pourraient-elles aussi abriter des formes de vie ? *« L'existence de ces océans vient naturellement bousculer l'idée d'une vie limitée aux seuls corps célestes tempérés à même de maintenir en surface de l'eau à l'état liquide*, poursuit Gabriel Tobie. *Mais* ◆◆◆

L'Univers insolite

9e planète, le retour ?

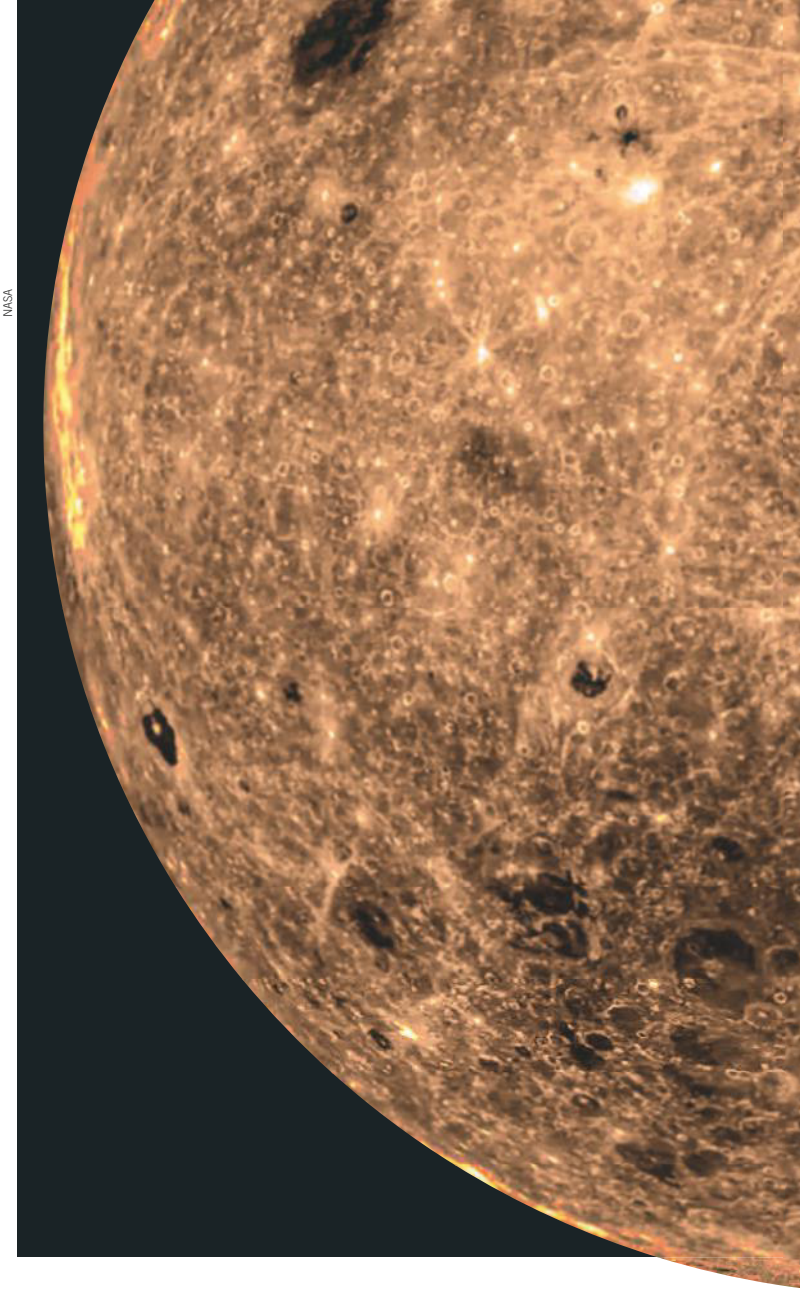
Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune… Se pourrait-il que la liste des planètes du Système solaire soit incomplète ? Sur la base de l'étude de six des Transneptuniens ou Objets de la ceinture de Kuiper, une famille de planétoïdes glacés circulant au-delà de Neptune, Mike Brown – le même astronome qui a destitué Pluton de son statut de planète, y gagnant le surnom de *« tueur de Pluton »* ! – et Konstantin Batygin, deux planétologues de l'Institut de technologie de Californie (Caltech), ont conclu en 2016 à la possible existence d'un corps céleste quelque part aux confins du Système solaire. Portrait-robot, affiné en 2021, de l'astre, rapidement baptisé P9 : un objet de cinq masses terrestres, tournant en dix mille ans environ sur une orbite inclinée de 20°, et situé au maximum à 500 années-lumière de distance. Il pourrait expliquer certaines caractéristiques actuelles du Système solaire mais aussi certaines de ses incohérences. Pour le moment, il n'a pas été débusqué. Mais la mise en service prochaine de l'observatoire Vera-Rubin, au Chili, capable d'effectuer un relevé complet du ciel en… trois jours, laissera peu de chance à une neuvième planète – si elle existe – d'échapper à la traque.

VAHÉ TER MINASSIAN

◆◆◆ *avant de qualifier ces environnements de potentiellement habitables, il faudrait au moins pouvoir démontrer qu'ils contiennent de la matière organique. Or, pour l'instant, seul l'océan d'Encelade a livré des molécules de ce type dans les échantillons de jet récupérés et analysés par Cassini. Certes, Titan en possède de grandes quantités, mais seulement au niveau de son atmosphère, siège d'un puissant cycle du méthane. Il n'est pas certain que son océan intérieur soit connecté à sa surface.* » Et même si des micro-organismes extraterrestres prospéraient dans ces poches aqueuses, comment le prouver ? Celles-ci sont ensevelies sous plusieurs dizaines de kilomètres de glace !

En 2027, un drone équipé d'instruments d'analyse survolera Titan

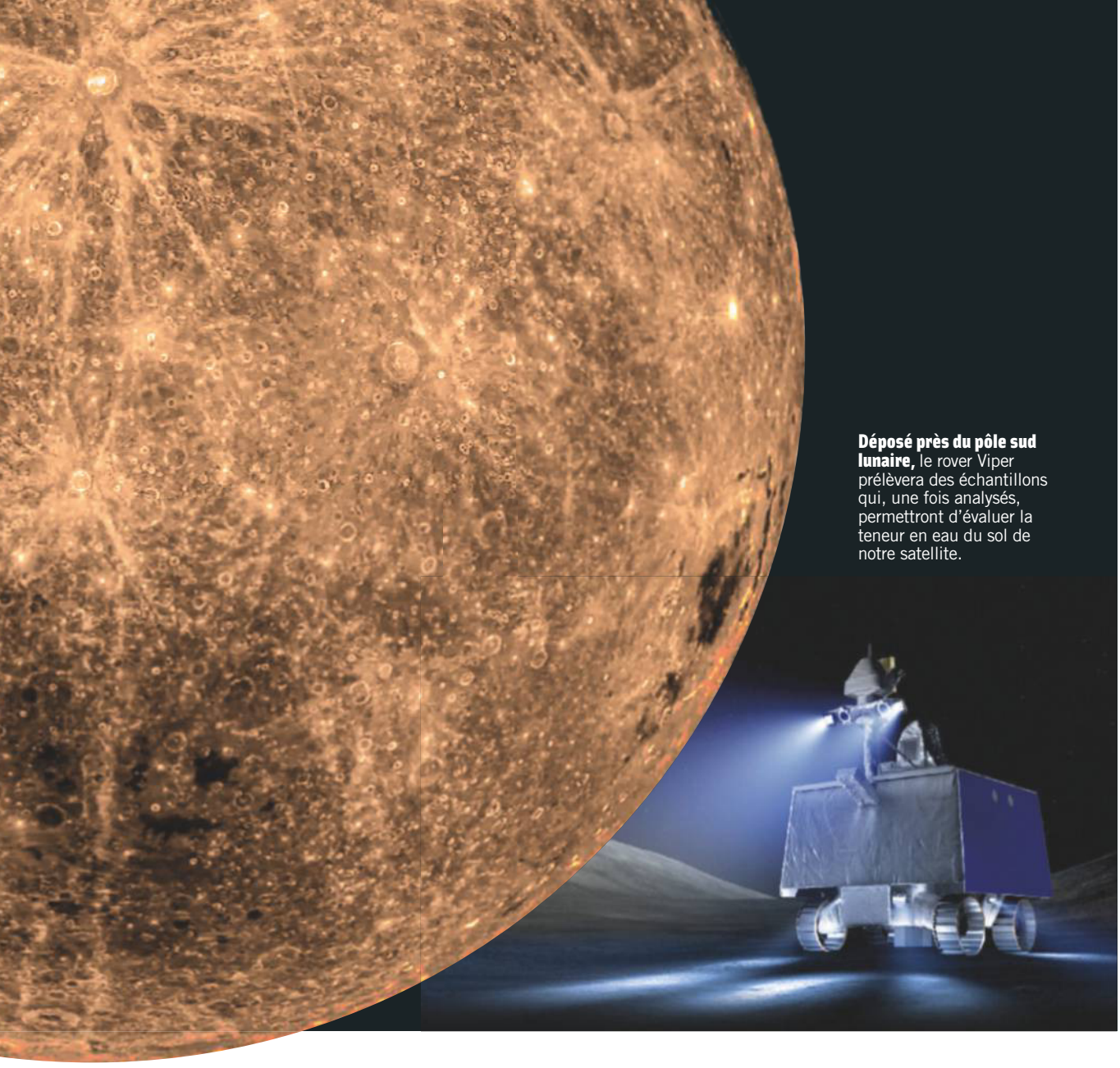
Les prochaines missions spatiales devraient permettre d'en savoir plus. Baptisée Juice, la première d'entre elles partira en avril 2023 de la base de Kourou (Guyane). Après un long voyage de neuf ans à travers le Système solaire, la sonde de l'Agence spatiale européenne ira survoler Europe, deux fois, puis Callisto, une vingtaine de fois, avant de se positionner en orbite pour neuf mois autour de Ganymède vers 2035. Son objectif : *« Établir à l'aide des dix instruments de bord la composition des enveloppes externes et internes de ces lunes, les caractéristiques de leurs océans, et détecter à leur surface d'éventuelles zones de remontées d'eaux saumâtres ou de matériaux souterrains »*, précise François Poulet, astronome à l'Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay et responsable du spectro-imageur Majis de Juice. Cela avant ou après l'arrivée, dans cette même banlieue de Jupiter, d'Europa Clipper. Cet engin de la Nasa, dont le départ est programmé pour octobre 2024, doit effectuer une cinquantaine de passages au-dessus d'Europe, en vue de préparer l'éventuel envoi sur place d'un atterrisseur capable de rechercher des traces d'activité biologique. Une ambition qui est aussi celle de la mission américaine Dragonfly qui explorera par la voie des airs, en 2027, la surface du satellite Titan, grâce à un « aérobot », une sorte de drone équipé d'instruments d'analyse. Avec, là aussi, un ambitieux dessein : déterminer si les lunes glacées des confins du Système solaire dissimulent d'autres formes de vie dans le secret de leurs compartiments internes… **VAHÉ TER MINASSIAN**



NASA

De l'eau glacée dans les cratères lunaires ?

Absence d'atmosphère et donc de nuages et de pluie, journées caniculaires… la Lune est sèche, très sèche. Nulle eau – liquide ou sous forme de vapeur – n'a jamais baigné les rivages de ses mers. Et pourtant, divers indices suggèrent que la molécule d'H_2O est bel et bien là. En particulier, les sondes de la Nasa Lunar Prospector et LRO ont détecté respectivement en 1998 et en 2009 d'importantes quantités d'hydrogène au niveau des pôles, indiquant une possible présence de glace. *« Celle-ci aurait été produite au fil du temps à partir de l'eau apportée par des micrométéorites, ou créée au cours de réactions chimiques*



Déposé près du pôle sud lunaire, le rover Viper prélèvera des échantillons qui, une fois analysés, permettront d'évaluer la teneur en eau du sol de notre satellite.

NASA/DANIEL RUTTER

entre les noyaux d'hydrogène émis par le Soleil et l'oxygène des roches, explique Pierre-Yves Meslin, chercheur à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie, et responsable de l'expérience Dorm d'étude des mécanismes de migration des gaz sélénites à bord de la future mission chinoise Chang'e 6. *Les chaleurs de la journée arracheraient de la surface de la Lune ces molécules d'eau qui, passées à l'état de gaz, parcourraient une certaine distance avant de se redéposer sur le sol au cours de la nuit. Celles qui tomberaient dans le fond des cratères, là où les températures sont réputées ne jamais dépasser les -173 °C, y resteraient piégées sous forme de glaces. »* De la glace cachée à l'ombre des reliefs… Mais en quelle quantité ?

« On parle d'une teneur de quelques pourcents à la profondeur de quelques décimètres où elle a été mesurée, poursuit l'astrophysicien. *Si les signaux détectés correspondent bien à de la glace, et non à de l'eau ou de l'hydrogène lié chimiquement à des minéraux ou des grains… »*

En 2023, l'astro-mobile Viper de la Nasa pourrait permettre d'en savoir plus. Objectif : explorer la pénombre des cratères sélénites pour y rechercher la fameuse glace ! Un rover de 430 kg sera déposé dans une région du pôle sud et réalisera une série de forages à l'intérieur du petit cratère Nobili, avant d'analyser les éléments volatils présents à l'intérieur des échantillons récoltés. Avec un espoir : déterminer combien les terrains lunaires contiennent réellement d'eau. Et ainsi établir si cette dernière pourrait, un jour, faire l'objet d'une exploitation… par exemple, pour la production du carburant des fusées en partance vers Mars ! Mais ça, c'est déjà une autre histoire…

V. T. M.

Des molécules organiques, de celles qui ont permis l'éclosion de la vie sur Terre, ont été découvertes sur quelques astéroïdes et comètes telle Tchouri. La quête de ces prémisses de matière vivante va désormais se poursuivre sur Mars, arpentée par le robot Curiosity, mais aussi, plus loin de nous, sur des exoplanètes.

Des « briques » de vie sur d'autres planètes ?

La vie existe-t-elle ailleurs que sur la Terre ? Au VIe siècle avant notre ère, des philosophes grecs comme Thalès, Anaximandre ou Héraclite envisageaient déjà une « *pluralité des mondes* ». Le sujet est plus pertinent encore depuis que nous savons que des milliards de milliards d'étoiles sont dotées, comme la nôtre, d'un cortège de planètes. Au point qu'il devient difficile de présumer qu'elle n'aurait jailli qu'une seule fois. La vie extraterrestre n'est d'ailleurs plus de nos jours une question en l'air, c'est une discipline : l'exobiologie.

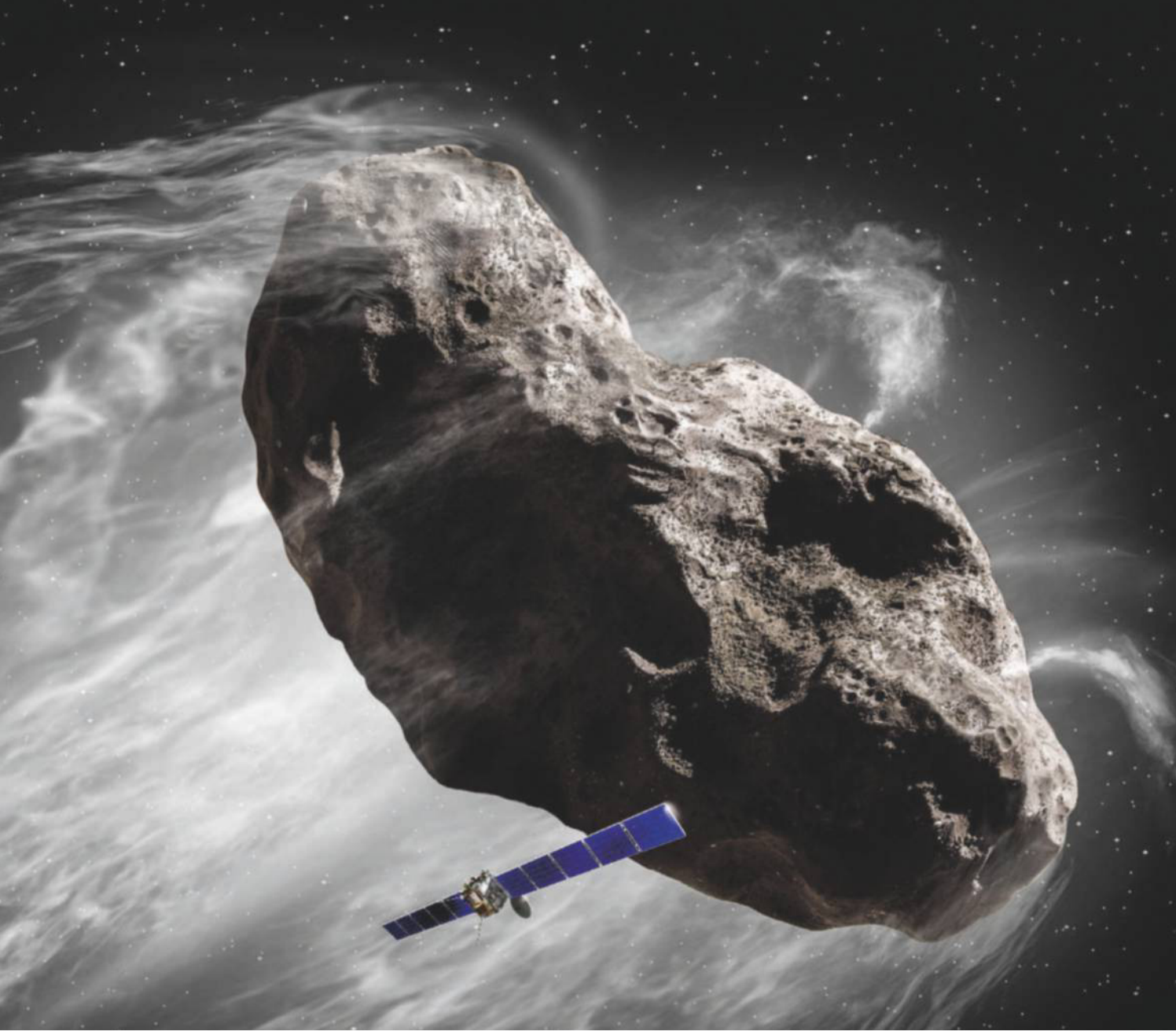
Question préalable : savons-nous, déjà, comment la vie a surgi sur Terre ? La chose s'est passée, au moins en partie, dans l'eau. Oui… mais où ? « *Les scénarios principaux la font émerger près de sources hydrothermales océaniques ou terrestres, ou encore dans des lacs*, expose Frances Westall, responsable du groupe Exobiologie du Centre de biophysique moléculaire à Orléans. *Je trouve très intéressante l'hypothèse d'une apparition de la vie à proximité des premières. Elles sont souvent entourées de sédiments d'origine volcanique riches en minéraux, qui ont pu jouer un rôle.* »

Mais avant même la vie, comment sont apparus sur notre planète les constituants de la matière vivante, ces molécules organiques d'une extraordinaire diversité mais toutes construites sur une ossature d'atomes de carbone ? Point de départ désormais solidement documenté : nombre d'entre elles se forment et sont stockées dans les astéroïdes, comètes et autres cailloux qui circulent dans le Système solaire… avant d'échouer, parfois, sur Terre. Les preuves de ce processus ne cessent de s'accumuler. Dès 1970, sur la célèbre météorite de Murchison tombée en Australie l'année précédente, on découvrait 18 acides aminés, ces pièces détachées des protéines. En 2010, des analyses plus poussées en dénombraient soixante-dix. Mieux, en 2019, une équipe japonaise y a décelé des sucres, en particulier du ribose, qui forme l'ossature de l'acide ribonucléique (ARN).

Une chimie organique détectée dans cinq disques protoplanétaires

Cette chimie organique primordiale, on l'a également traquée en remontant « à la source ». En 2006, la sonde Stardust de la Nasa a ainsi rapporté un peu de poussière prélevée deux ans plus tôt dans la queue de la comète 81P/Wild. Les scientifiques y ont détecté des fonctions organiques simples (alcool, cétone, aldéhyde, carboxyle…), mais aussi un acide aminé essentiel, la glycine, également recueilli dix ans plus tard sur la comète Tchouri par la mission Rosetta. Côté astéroïdes, la sonde japonaise Hayabusa 2 a étudié Ryugu, entre 2018 et 2019, et lui a même chipé 5,4 grammes de matière. Les premières analyses suggèrent une fois encore la présence de nombreuses molécules organiques. Les échantillons collectés par la sonde Osiris-Rex de la Nasa sur l'astéroïde Bénou sont sur le chemin du retour, et

astrobioeducation.org
Un site très pédagogique sur l'exobiologie, créé à l'initiative de deux chercheurs : Muriel Gargaud (Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux) et Hervé Cottin (Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques)



RON MILLER /SPL/SUCRÉ SALÉ

Satellite d'observation à proximité du noyau d'une comète. Ces astres abritent des molécules oprganiques, briques de la vie. Vue d'artiste.

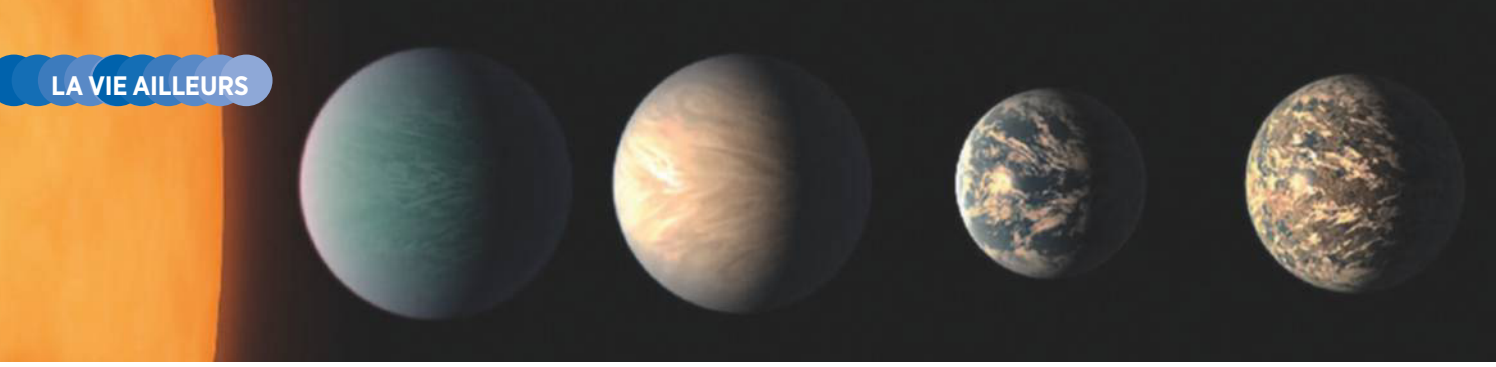
attendus pour 2023. Ces molécules organiques préexistent même à la formation des planètes, comme l'a montré une équipe internationale en septembre 2021. À l'aide du radiotélescope Alma au Chili, elle a observé cinq disques protoplanétaires – de futurs systèmes solaires – et y a détecté trois molécules organiques simples mais essentielles : cyanure d'hydrogène (HCN), éthynyl (C2H) et formaldéhyde (H_2CO). *« Mais rien ne prouve que la vie soit apparue sur Terre exclusivement, ou même partiellement, à partir de ces "briques" tombées du ciel »,* rappelle Franck Selsis, du Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux.

Bien avant de découvrir cette chimie organique cosmique, on a exploré l'hypothèse selon laquelle elles se seraient formées sur Terre, dans une « soupe primitive ». Darwin lui-même imaginait, en 1871 *: « Mais si (un énorme si !) nous pouvions concevoir dans quelque petite mare chaude avec toutes sortes de sels d'ammonium et de phosphate, de la lumière, de la chaleur, de l'électricité […] qu'un composé protéique puisse se former par voie chimique »*... La première preuve étayant cette idée sera livrée en 1953 par le chimiste états-unien Stanley Miller via une expérience restée dans les annales. ◆◆◆

BENJAMIN PAVONE

« RIEN NE PROUVE QUE LA VIE SOIT APPARUE SUR TERRE EXCLUSIVEMENT, OU MÊME PARTIELLEMENT, À PARTIR DE MOLÉCULES TOMBÉES DU CIEL »

Franck Selsis, Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux



SPITZER TELESCOPE/NASA

◆◆◆ Dans un ballon, il soumet un mélange de méthane, d'ammoniac, d'hydrogène et de vapeur d'eau, censé reproduire l'atmosphère primitive, à l'action d'un arc électrique, car il suppose que les orages auraient été une source d'énergie essentielle… Après sept jours, il détecte dans son ballon quatre acides aminés. Mais les hypothèses de Stanley Miller sur la composition de l'atmosphère primitive ont fait long feu. On l'envisage aujourd'hui comme un mélange de dioxyde de carbone, d'azote et surtout de vapeur d'eau, et son expérience a été révisée de multiples fois avec cette nouvelle donne. Par ailleurs, un nombre croissant de chercheurs insistent sur le fait que certaines réactions chimiques essentielles à l'apparition du vivant ne peuvent se produire dans l'eau, et leurs expériences alternent des phases liquides et sèches. C'est le cas notamment de John Sutherland, à l'université de Cambridge. Il montre en 2015 que, sous l'effet d'un rayonnement UV, et en présence de cuivre, du cyanure d'hydrogène (HCN) et du sulfure d'hydrogène (H_2S) peuvent produire des acides aminés, des lipides et même des ribonucléotides. Des travaux qui étaient l'hypothèse d'un processus d'émergence de la vie passant par la terre ferme, des ingrédients de cette « soupe primitive » pouvant avoir une origine volcanique (sulfure) ou météoritique (cyanure).

ROBERT MARKOWITZ/NASA

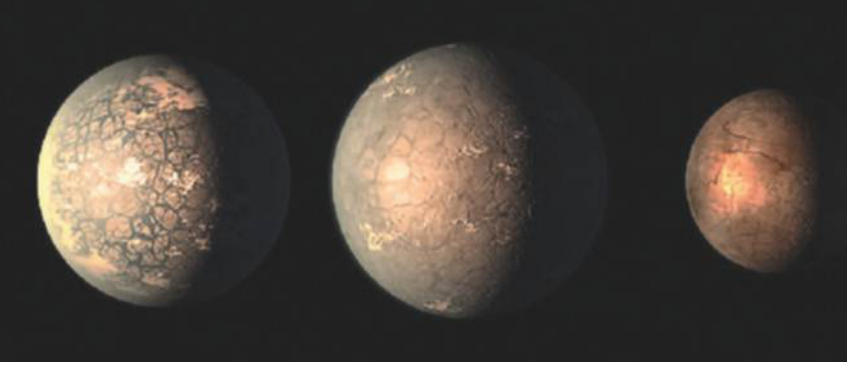
Grains de matière céleste. Dans cette petite capsule en inox, quelques décigrammes de poussière prélevés sur l'astéroïde Ryugu par la sonde japonaise Hayabusa 2. L'échantillon a révélé la présence de matière organique et de composés azotés.

Mais on n'a pas attendu d'élucider le scénario précis de l'apparition de la vie sur Terre pour commencer à la chercher ailleurs. Et tout d'abord sur Mars. Le rover Curiosity, qui l'arpente depuis dix ans – tout comme Perseverance depuis février 2021 – y a détecté des molécules organiques non encore précisées. Surtout – résultats publiés en janvier dernier –, il a mesuré la proportion de l'isotope carbone 12 et trouvé des valeurs fort intrigantes. La publication propose trois scénarios pouvant expliquer ce phénomène, dont un impliquerait une activité biologique. Affaire à suivre…

C'est aussi d'un robot européen, ExoMars, que l'on espère des révélations... si la mission peut se dérouler. Il devait se poser sur la planète rouge en mars 2023, mais la Russie fournissant le lanceur et la plateforme d'atterrissage, le programme semble compromis. L'astrochimiste Hervé Cottin, président de la Société française d'exobiologie, est membre de l'équipe qui a conçu son principal instrument, Moma (Mars

Une vie sans carbone est-elle possible ?

**La vie telle qu'on la connaît repose sur le carbone et l'eau. Le premier forme naturellement toutes sortes de chaînes, linéaires, ramifiées ou cycliques, sur lesquelles s'accrochent des atomes d'hydrogène, d'oxygène, d'azote… Une multitude de molécules dotées de propriétés chimiques d'une considérable diversité. Le carbone doit cette malléabilité à sa « tétravalence » : il comporte quatre électrons sur sa couche externe, ce qui lui permet de se lier à quatre autres atomes. Mais doit-on pour autant postuler que la vie ne peut se construire que sur le carbone ? On pense notamment au silicium, également tétravalent, qui peut donc former une grande diversité de molécules. Premier obstacle : elles sont bien moins stables que les molécules carbonées. Par ailleurs, *« le silicium, sur Terre, est bloqué sous forme de silicate, de cailloux*, souligne Franck Selsis. *La valence ne détermine pas tout. La complexité que permet le carbone lui confère un avantage évident. »* De plus, ajoute Hervé Cottin, « *il est dix fois plus abondant dans l'Univers que le silicium. »*
Et l'eau ? « *C'est la molécule la plus abondante, après le dihydrogène (H_2)* », indique le chercheur. Et un solvant formidable. On peut bien sûr imaginer une vie apparaissant dans un autre liquide. Comme l'ammoniac, ou le méthane liquide. Mais à nouveau, de nombreuses considérations chimiques en font des candidats bien moins probables.**



Si loin, si proches… Le système Trappist-1, situé à environ 40 années-lumière de la Terre : sept planètes telluriques de taille comparable à la nôtre. Trois d'entre elles (au centre), situées dans la zone « habitable » de leur étoile, pourraient abriter de l'eau à l'état liquide.

Organic Molecule Analyser). *« ExoMars devrait être le premier robot à creuser profondément dans le sol,* précise-t-il. *Or, les conditions de surface étant très oxydantes, des échantillons récupérés en profondeur devraient être plus représentatifs de ce qui s'est passé à une époque qui aurait permis l'apparition de la vie. »*
L'instrument Moma pourra identifier des molécules organiques avec précision et étudier leur « chiralité ». Explications de l'astrochimiste François Raulin, chercheur à l'université Paris-Est Créteil : *« Beaucoup de molécules organiques peuvent exister sous deux formes ou "énantiomères". Chacun est le symétrique de l'autre, l'image de l'autre dans un miroir. »* Comme nos deux mains. Or la vie a fait ses choix

L. HONNORAT

« LES ÉCHANTILLONS RÉCUPÉRÉS EN PROFONDEUR PAR LE ROBOT EXOMARS DEVRAIENT ÊTRE REPRÉSENTATIFS DE CE QUI S'EST PASSÉ À UNE ÉPOQUE QUI AURAIT PERMIS L'APPARITION DE LA VIE »

Hervé Cottin, astrochimiste, président de la Société française d'exobiologie

et, par exemple, n'utilise que la forme L ou lévogyre – du latin *laevus*, gauche – des acides aminés. En conséquence, beaucoup de molécules organiques issues du vivant sont « homochirales » – elles ont la même orientation – alors que les mêmes molécules issues d'une chimie abiotique apparaissent à 50/50 lévogyres et dextrogyres. *« Moma est doté de tout ce qu'il faut pour mesurer la chiralité des molécules organiques,* poursuit le chercheur. *Un élément de réponse essentiel à la question de l'existence d'une vie passée ou présente. »*
Et à part Mars ? Vénus est un candidat peu convaincant, étant donné la température qui y règne (près de 500 °C), peu propice à l'apparition de la vie, ni à la conservation de traces de vie éteinte. Ni d'ailleurs au bon fonctionnement d'une sonde spatiale… *« C'est plutôt vers des lunes de Jupiter et de Saturne que les regards se tournent,* indique Hervé Cottin *(lire p. 64-67).*
Mais les exobiologistes voient déjà plus loin, vers les exoplanètes, quelque cinq mille recensées à ce jour. Ils se focalisent sur les planètes telluriques qui, comme la Terre, possèdent une surface solide, sont rocheuses et riches en éléments chimiques variés. Précisément celles situées dans la « zone habitable » de leur étoile, en orbite à une distance telle que l'eau liquide puisse y exister. Les planètes « Boucle d'or », référence à un conte dont l'héroïne préfère boire dans le bol de Petit Ours parce qu'il n'est *« ni trop chaud, ni trop froid ».*
Franck Selsis est l'un des signataires d'une publication de 2017 décrivant par le menu le système Trappist-1, riche de sept planètes – un record – telluriques. *« Elles ont des dimensions et des masses assez voisines de celles de la Terre,* affirme Franck Selsis. *Leur étoile est une naine rouge, plus petite et froide que le Soleil, et donc moins lumineuse… mais elles en sont très proches. Leur insolation est donc assez semblable à celle de notre planète. »* Comment en savoir plus ? *« Le télescope James-Webb va tenter l'observation d'éventuelles atmosphères sur ces planètes »,* précise Franck Selsis. Quant à Plato, que l'ESA doit lancer en 2026, il est conçu pour découvrir et caractériser des planètes rocheuses. Dans la liste des exoplanètes telluriques à scruter, certaines se remarquent du fait de leur (relative) proximité. Comme Teegarden b, à « seulement » 12 années-lumière… Et surtout Proxima Centauri b, qui tourne dans la zone habitable de l'étoile la plus proche de nous, à 4,2 années-lumière.
Et si la vie était banale dans l'Univers… mais pas au point que la plus proche planète vivante soit à portée de main ? Il faudrait alors s'armer de patience…

PIERRE VANDEGINSTE

L'Univers insolite

Et si le ciel nous tombait sur la tête ?

L'humanité se prépare à contrer de dangereux bolides. *« Nous cataloguons les "géocroiseurs", ces objets dont l'orbite croise celle de la Terre,* explique Patrick Michel, chercheur à l'observatoire de la Côte d'Azur. *Nous en avons déjà repéré un petit millier dont la taille dépasse le kilomètre, pouvant presque tous causer un désastre planétaire. Et nous traquons ceux de plus de 140 mètres, qui pourraient anéantir un pays. On en a trouvé 10 000, 40 % de ceux qui existent. »* Pour l'instant, aucune collision en vue. Et l'on teste des parades. *« La technique la plus mûre consiste à percuter le bolide pour dévier sa trajectoire »,* poursuit Patrick Michel, également responsable de la mission Hera de l'ESA, qui va contribuer au premier test de déviation d'un astéroïde, avec la Nasa. Celle-ci a lancé en 2021 la mission Dart vers un duo d'astéroïdes inoffensifs, Didymos (780 m de diamètre) et Dimorphos (160 m), qui orbite autour de lui. Fin septembre, la sonde doit percuter Dimorphos. Quatre ans plus tard, Hera viendra mesurer la nouvelle orbite et cartographier le cratère d'impact. *« Une étape cruciale, car l'efficacité de l'impact dépend de la structure et des propriétés mécaniques du corps visé »,* indique Patrick Michel. P. V.

Si des civilisations extraterrestres avancées existent, pourquoi ne nous ont-elles pas contactés ? Telle est la question insolite, voire existentielle, que pose le paradoxe de Fermi. Alors que de nombreux chercheurs ont tenté d'esquisser des réponses, d'ambitieux programmes sont aujourd'hui lancés dans l'espoir de capter le moindre signe de vie.

Recherche E.T. désespérément...

Le *Guide du voyageur galactique*, adaptation réalisée en 2005 de l'œuvre de l'écrivain Douglas Adams.

PHOTO12/7E ART/TOUCHSTONE PICTURES

L'Univers est vieux et vaste, infini peut-être. Avec ses 13,8 milliards d'années et ses centaines de milliards de galaxies, qui contiennent elles-mêmes des centaines de milliards d'étoiles, difficile – effrayant, même ! – de penser que nous en sommes les seuls habitants. Et pourtant, lorsque l'humanité tend l'oreille vers le cosmos, à la recherche d'un message ou d'une quelconque trace, c'est le silence. En 1950, ce constat conduit le physicien italo-américain Enrico Fermi (1901-1954) à formuler une question très simple : mais où sont donc les extraterrestres ?

Notre galaxie à elle seule contient entre 200 et 300 milliards d'étoiles, dont 10 à 40 milliards de naines jaunes, comme le Soleil. Les astronomes estiment que 20 % de ces dernières disposent d'une planète située dans leur zone d'habitabilité. En imaginant que seulement 0,1 % de ces planètes hébergent effectivement une forme de vie, on atteint le nombre astronomique de… un million de planètes habitées dans la Voie lactée. Dans ce cas, comment est-il possible que nous n'ayons pas été contactés par des extraterrestres ? Selon Gabriel Chardin, de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (CNRS), pour qu'une civilisation plus ou moins proche, biologiquement, de la nôtre parte à la conquête des étoiles, encore faudrait-il que sa planète natale dispose d'assez de métal en son sein pour rendre possible un certain degré de développement technologique.

Mathieu Agelou, Gabriel Chardin, Jean Duprat, Alexandre Delaigue et Roland Lehoucq, *Où sont-ils ?* CNRS éditions, 2017

Exoplanètes, croissance et paradoxe de Fermi, conférence virtuelle d'Aurélien Crida, Observatoire de la Côte-d'Azur, 14 août 2020, sciav.fr/ACrida

Extraterrestre, il est Fermi d'en douter, *La Méthode scientifique*, France Culture, émission du 3 janvier 2020, sciav.fr/radioFermi

Une colonisation par bonds successifs, d'une planète habitable à une autre…

En admettant qu'elle parvienne à se développer de la sorte, Enrico Fermi estime qu'elle ne pourrait qu'aspirer à coloniser la galaxie, qu'importe ses motivations. Il postule que cela pourrait se faire par bonds successifs d'une planète habitable à une autre, chaque cycle de colonisation s'échelonnant sur des centaines, voire des milliers d'années. Si une civilisation pouvait produire des « vaisseaux générationnels » capables de voyager à une petite fraction de la vitesse de la lumière, et parvenait à subvenir aux besoins de la population embarquée pendant environ 1 000 ans, il « suffirait » de deux millions d'années pour coloniser l'ensemble de la galaxie, dont le rayon est d'environ 50 000 années-lumière. Un délai court par rapport à l'âge de la vie sur Terre, estimé à 4 milliards d'années. Ainsi, de telles civilisations auraient certainement visité la Terre, peut-être même plusieurs fois.

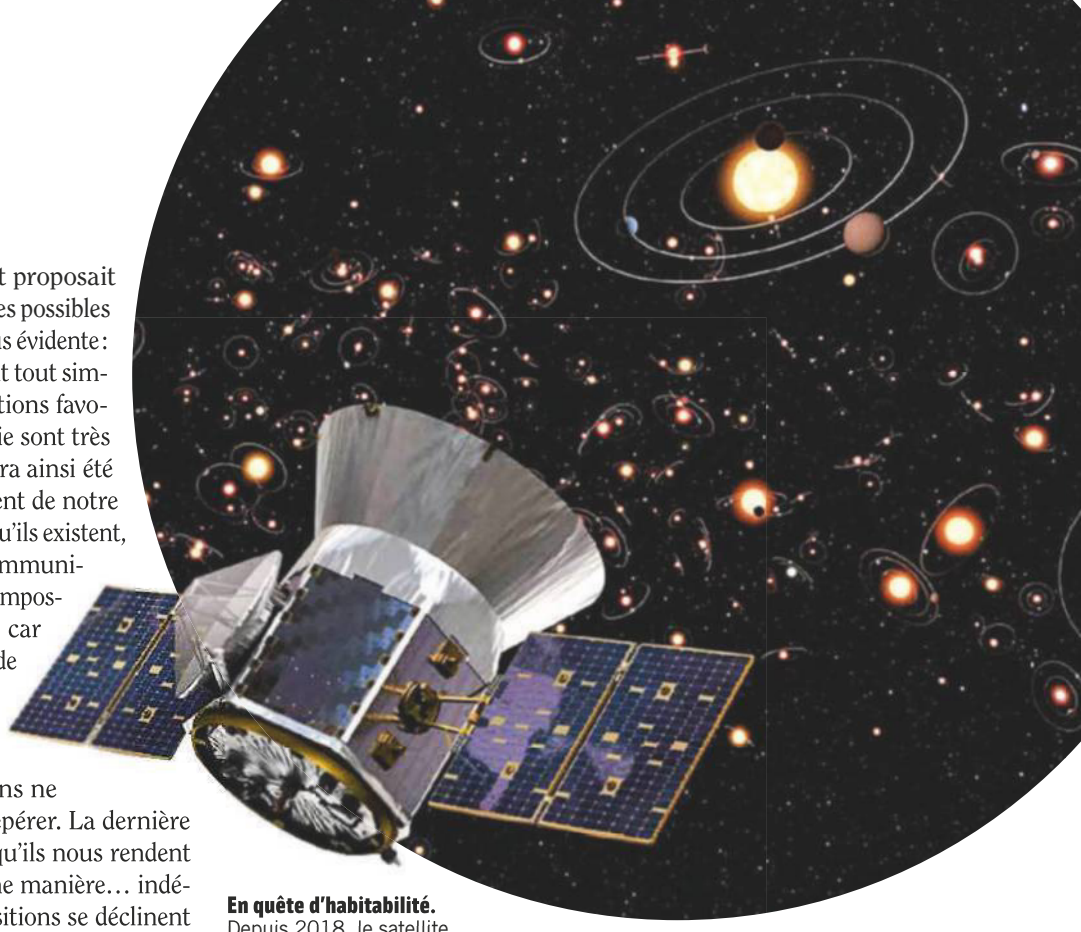
Derrière cet exercice de pensée insolite se cache une interrogation existentielle tout à fait sérieuse. La question de la vie ailleurs dans l'Univers intrigue et fascine depuis longtemps… En 1975, l'astrophysicien amé- ◆◆◆

RÉMY CORTIN

« ON POURRAIT AVOIR AFFAIRE À DES "FLASHS" DE CIVILISATIONS, DISPARUES AUSSI VITE QU'ELLES SONT APPARUES… À L'ÉCHELLE DES TEMPS COSMIQUES »

Gabriel Chardin, Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (CNRS)

◆◆◆ ricain Michael Hart proposait quatre catégories de réponses possibles au paradoxe de Fermi. La plus évidente : les extraterrestres n'existent tout simplement pas, car les conditions favorables à l'apparition de la vie sont très rares. Un univers entier aura ainsi été nécessaire au développement de notre civilisation. Il se peut aussi qu'ils existent, mais que le voyage et la communication interstellaires soient impossibles ou non souhaitables, car trop risqués. Hart se demande encore s'ils ne pourraient pas occuper des régions que les moyens technologiques dont nous disposons ne nous permettent pas de repérer. La dernière hypothèse consiste à dire qu'ils nous rendent bel et bien visite, mais d'une manière… indétectable. Ces quatre propositions se déclinent en dizaines d'autres : la Terre serait comme un parc animalier ou une réserve naturelle, et le contact avec les indigènes que nous sommes, interdit ; nous serions exclus d'une potentielle « communauté galactique » tant que nous n'aurions pas atteint une maturité technologique suffisante ; les extraterrestres seraient si différents de nous qu'il nous serait impossible de les identifier – par exemple si leur chimie fondamentale n'était pas la même que la nôtre.



En quête d'habitabilité. Depuis 2018, le satellite Tess scrute les systèmes solaires de notre galaxie à la recherche de planètes habitables.

ESA/ESO/NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/CORNELL UNIVERSITY

Nous, Terriens, serions en pleine adolescence technologique

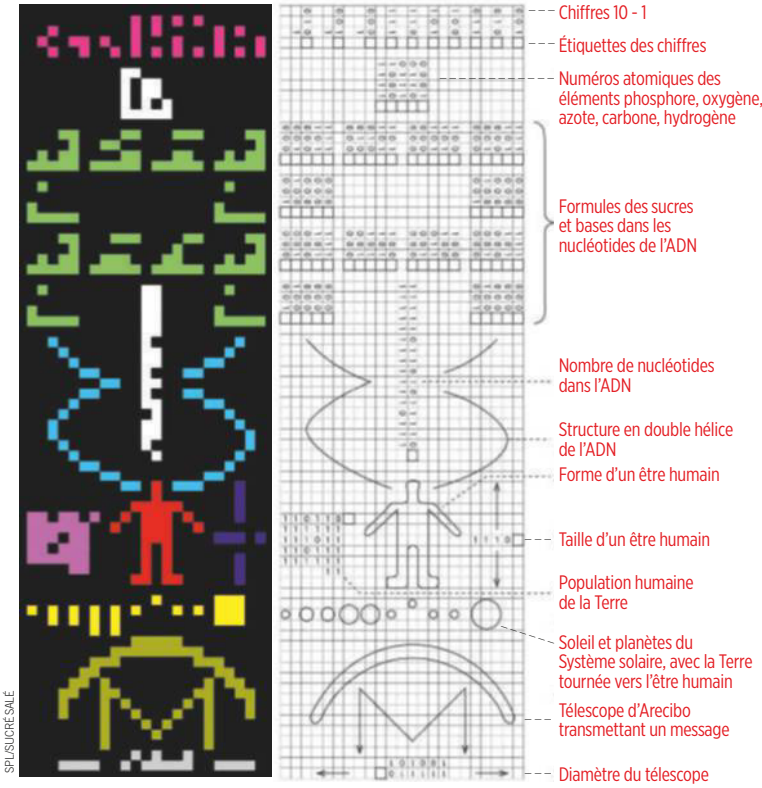
Les esprits de la science et de la science-fiction proposent depuis des décennies des outils et des solutions pour tenter de résoudre ce paradoxe. En 1961, l'astronome américain Frank Drake formulait une équation pour estimer le nombre potentiel de civilisations extraterrestres dans la Voie lactée. Avec toutefois un biais majeur : la plupart de ses paramètres – comme le nombre de planètes habitables par étoile ou la durée de vie moyenne d'une civilisation – étaient incertains. Trois ans plus tard, l'astronome soviétique Nikolaï Kardachev mettait au point une typologie des civilisations fondée sur leur niveau technologique et leur consommation d'énergie. Il les classait ainsi selon leur capacité à utiliser toute la puissance issue de leur planète d'origine (type I), de leur étoile (type II) et de leur galaxie (type III). D'après le pionnier de l'exobiologie Carl Sagan (1934-1996), nous,

Beaucoup de bruit… pour rien

Le cosmos est immense et bruyant. Comment les astronomes savent-ils où et quoi chercher pour détecter une potentielle civilisation extraterrestre ? Dans le vaste flot d'informations qui nous parvient des étoiles, la vie peut se manifester de bien des manières. L'organisme unicellulaire, la vie dans sa plus simple expression, peut déjà avoir un impact sur la composition de l'atmosphère de sa planète berceau. Sur Terre, par exemple, les cyanobactéries ont provoqué une oxygénation de notre atmosphère il y a 2,1 milliards d'années. Le télescope spatial James-Webb va justement observer et analyser la composition atmosphérique de nombreuses exoplanètes, dans l'espoir d'y déceler la trace de composés propices à la vie ou résultant de son activité. Des formes de vie plus avancées peuvent avoir émis, volontairement ou non, des signaux radio ou de diverses natures dans l'espace. L'humanité est par exemple très bruyante depuis l'invention de la radio à la fin du XIXe siècle ; mais aussi très visible : les Romains ont annoncé notre présence au reste de l'Univers il y a plus de deux mille ans, en exploitant massivement leurs mines d'argent qui ont provoqué une importante pollution au plomb de l'atmosphère. Outre le James-Webb, un radiotélescope géant, le Square Kilometer Array *(lire p. 24-25)*, dont la construction a commencé en 2021, sondera lui aussi l'atmosphère d'exoplanètes lointaines à la recherche de composés essentiels à la vie. Il recueillera les émissions radio même les plus faibles issues de « potentielles communications extraterrestres ». À ce jour déjà, avec des programmes comme Breakthrough Listen (100 millions de dollars) de l'astrophysicien et milliardaire russe Yuri Milner, de nombreuses étoiles sont sur écoute… mais, pour le moment, silence radio.

Terriens, serions en pleine adolescence technologique, et sur le point de devenir une civilisation de type I – d'ici un à deux siècles. Mais en 13,8 milliards d'années, l'Univers a-t-il jamais vu poindre une civilisation de type II, voire III ? Pour expliquer l'absence de ces dernières, Robin Hanson, chercheur à l'université d'Oxford, publiait en 1998 sa théorie du Grand Filtre. Celle-ci présume qu'une suite d'obstacles empêche l'émergence d'une civilisation durable. Si ces barrières se trouvent derrière nous, l'humanité pourrait bien être la toute première civilisation à les avoir franchies avec succès. La transition de la vie unicellulaire vers sa forme pluricellulaire, la sortie des eaux ou le développement de l'intelligence constituent autant d'obstacles potentiels déjà vaincus. En revanche, si ce filtre se trouve devant nous, cela induit que des civilisations ont pu voir le jour par le passé avant de disparaître à cause de problèmes majeurs que nous sommes sur le point de rencontrer : crise climatique, conflits, surpopulation… *« On aurait ainsi affaire à des "flashs" de civilisations, disparues aussi vite qu'elles sont apparues à l'échelle des temps cosmiques »*, résume Gabriel Chardin. Pour lui, nous sommes justement au seuil d'une période de grande instabilité, alimentée par la croissance exponentielle de la population et de la consommation. *« Avec un taux de croissance annuel de 2 % seulement, il suffirait de 5300 ans pour épuiser les ressources de la galaxie. »* Le lancement d'une simple sonde dans l'espace est un gouffre à ressources, et il est indispensable de mettre au point une stratégie viable pour préserver celles de la Terre avant de rêver de voyages interstellaires… et de rencontres du troisième type.

Le paradoxe de Fermi ne pourra être résolu sans preuves concrètes de l'existence des extraterrestres. Depuis le début des années 1960, certains astronomes les cherchent avec beaucoup de sérieux à travers le projet Search for Extra-Terrestrial Intelligence (Seti) qui rassemble toutes les initiatives visant à détecter une civilisation extraterrestre.



SPL/SUCRE-SALÉ

Comme une bouteille à la mer. En 1974, le puissant radiotélescope d'Arecibo, sur l'île de Porto Rico, envoyait ce message en direction de l'amas d'Hercule, distant de 25000 années-lumière. Objectif : entrer en contact avec d'éventuelles civilisations extraterrestres. Les couleurs (à gauche) ont été rajoutées *a posteriori*.

Le mystérieux signal « Wow ! », toujours sans explication consensuelle

Mais comment procéder pour trouver ce qui n'existe peut-être pas, souhaite cacher son existence ou communique par des moyens qui nous dépassent ? Les astronomes doivent d'abord définir ce qu'ils cherchent, et où *(lire l'encadré)*. Puis, pointer vers l'espace antennes et radiotélescopes destinés à récolter d'immenses quantités de données sur des millions de fréquences, dans l'espoir de relever un signal d'origine artificielle. En 1977, l'astrophysicien américain Jerry R. Ehman a détecté un signal radio d'une durée de 72 secondes, si puissant qu'il l'annote d'un enthousiaste *« Wow ! »*. Un événement atypique car s'il provient d'une direction très précise, il n'est pour autant associé à aucun phénomène naturel. À ce jour, aucune explication proposée ne fait consensus.

« Le problème intrinsèque du paradoxe de Fermi, c'est qu'il est anthropocentrique, conclut le géochimiste Sylvain Bernard. *Considérer que l'évolution doit inéluctablement converger vers l'intelligence, la civilisation et l'exploration spatiale est une erreur. Elle est purement aléatoire. Sur Terre, elle a produit l'humain, mais c'est le résultat d'un concours de circonstances inouï. »*

WILLIAM ROWE-PIRRA

SYLVAIN BERNARD

« CONSIDÉRER QUE L'ÉVOLUTION DOIT INÉLUCTABLEMENT CONVERGER VERS L'INTELLIGENCE, LA CIVILISATION ET L'EXPLORATION SPATIALE EST UNE ERREUR »

Sylvain Bernard, géochimiste à l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie de Paris

STEPHAN MARTINERE

Le cosmos est une source d'inspiration infinie pour bien des auteurs, qu'ils s'aventurent dans des mondes extraterrestres, dans notre cerveau… ou aux limites du temps.

Livres

Le problème d'un monde instable

C'est en partant du « problème à N corps », un casse-tête mathématique dans la résolution duquel s'est illustré le Français Henri Poincaré à la fin du XIXe siècle, que Liu Cixin a imaginé cette saga. Ce *Problème à trois corps* – premier tome d'une trilogie – a reçu en 2015 le prestigieux prix Hugo aux États-Unis. *« Liu Cixin a travaillé pendant plusieurs années comme ingénieur dans une centrale nucléaire,* a expliqué à *Sciences et Avenir* le traducteur français du livre, Gwennaël Gaffric. *On le classe généralement parmi les auteurs de hard SF, une science-fiction préoccupée par la cohérence scientifique de son propos. »*

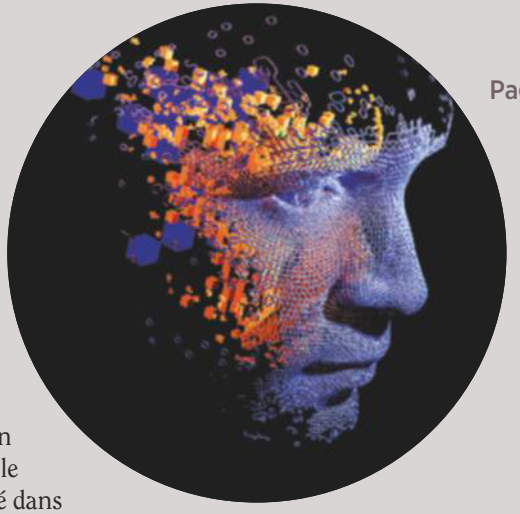
Le « problème » désigne ici l'instabilité gravitationnelle dans laquelle se trouve une exoplanète en orbite autour de trois étoiles… La détection d'un signal envoyé par des scientifiques chinois donne l'idée à ses habitants, les Trisolariens, d'envahir la Terre. Le livre ouvre une fenêtre sur les possibilités – et les risques – d'une exploration du cosmos. Par le spectre des sujets qu'il embrasse, c'est aussi une riche investigation de l'univers scientifique contemporain : surpopulation de notre planète, contraintes sur les ressources, transhumanisme, effets physiologiques et physiques que l'aventure spatiale exerce sur l'espèce humaine…

Le Problème à trois corps, Liu Cixin, Actes Sud, 2016.

L'entretien vidéo avec G. Gaffric, tourné en 2018, est à retrouver sur le site de *Sciences et Avenir*: sciav.fr/3corps

Pages réalisées par Olivier Lascar

Les arcanes du cyberpunk



SHUTTERSTOCK

Le terme « cyberespace » a été inventé en 1982 par l'Américain William Gibson dans sa nouvelle « Gravé sur chrome », puis développé dans son livre *Neuromancien*. L'incipit – *« Le ciel au-dessus du port avait la couleur d'une télévision allumée sur une chaîne défunte »* – donne le ton. Il ne s'agit pas seulement de dévoiler le monde virtuel construit par la technologie, mais de montrer que celle-ci a pénétré, comme par contagion, la réalité. Les puces sont implantées dans le cerveau, les prothèses de bras ou les yeux artificiels foisonnent. La techno n'est pas là pour adoucir le monde : on est dans une société sauvage, dominée par le chacun pour soi, façonnée par un hypercapitalisme où les grandes entreprises ont plus de pouvoir que les États. Vous avez dit Gafam ? Voilà le *« cyberpunk »*, ce *« futur reconnaissable et scrupuleusement extrapolé de notre société moderne »*, selon l'écrivain Bruce Sterling, spécialiste du genre.

Voir aussi l'entretien avec Yannick Rumpala, maître de conférences à l'université de Nice, publié en septembre 2021 sur le site de *Sciences et Avenir*: sciav.fr/cyberpunk

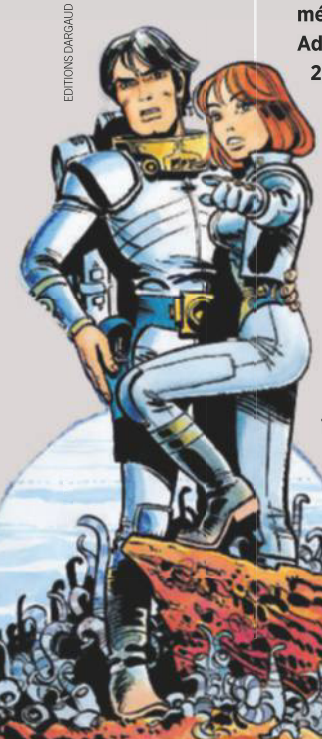
Neuromancien, William Gibson, Au Diable Vauvert, 2020.

BD

Valérian et Laureline, agents spatio-temporels

Ne sont-ils pas les Adam et Ève du nouvel âge spatial ? Au XXVIIIe siècle, les agents Valérian et Laureline partent à travers l'espace et le temps défendre les intérêts de la mégalopole terrienne Galaxity. Adaptée au cinéma par Luc Besson en 2017, la série est née cinquante ans plus tôt dans les pages du journal *Pilote,* alors sous la houlette de Goscinny. Elle a marqué l'histoire de la science-fiction. Ainsi George Lucas lui a beaucoup emprunté pour ses *Star Wars* (la tenue de Leia dans *Le Retour du Jedi* vient du *Pays sans étoile*), de même que Luc Besson pour *Le Cinquième Élément.* Mézières a participé à la conception visuelle de ce dernier film. L'artiste étant décédé le 23 janvier dernier, on aura à cœur de relire cette saga foisonnante dans son intégrale.

Valérian et Laureline, Jean-Claude Mézières et Pierre Christin, Dargaud.



EDITIONS DARGAUD

L'appel de Cthulhu

Howard Phillips Lovecraft (1890-1937) était féru d'astrophysique. En 1930, il intègre la découverte de Pluton à sa nouvelle « Celui qui chuchotait dans les ténèbres » : il fait de l'astre la planète d'origine de créatures extraterrestres qui terrorisent la Nouvelle-Angleterre, région où il vit et situe ses textes. La plus célèbre est Cthulhu, le géant à tête de poulpe. Caché au fond de l'océan, il attend *« en rêvant »* que l'artiste Gou Tanabe vienne l'aider à donner libre cours à sa fureur…

Les Chefs-d'œuvre de Lovecraft - L'Appel de Cthulhu, d'après Lovecraft, Gou Tanabe, Ki-oon, 2020.

Entre réel et virtuel

« C'est un univers de carton, et si vous poussez trop fort dessus, vous passerez au travers. » Ainsi le grand auteur américain Philip K. Dick (1928-1982) exprime-t-il son obsession pour l'exploration des frontières entre univers réels et virtuels. *Ubik* en est une parfaite illustration, avec ses aventuriers essuyant une explosion terrible dont ils ressortent indemnes… pour se rendre compte qu'ils sont morts et évoluent dans un monde parallèle !

Ubik, Philip K. Dick, 10/18, 1999.

Un récit quantique

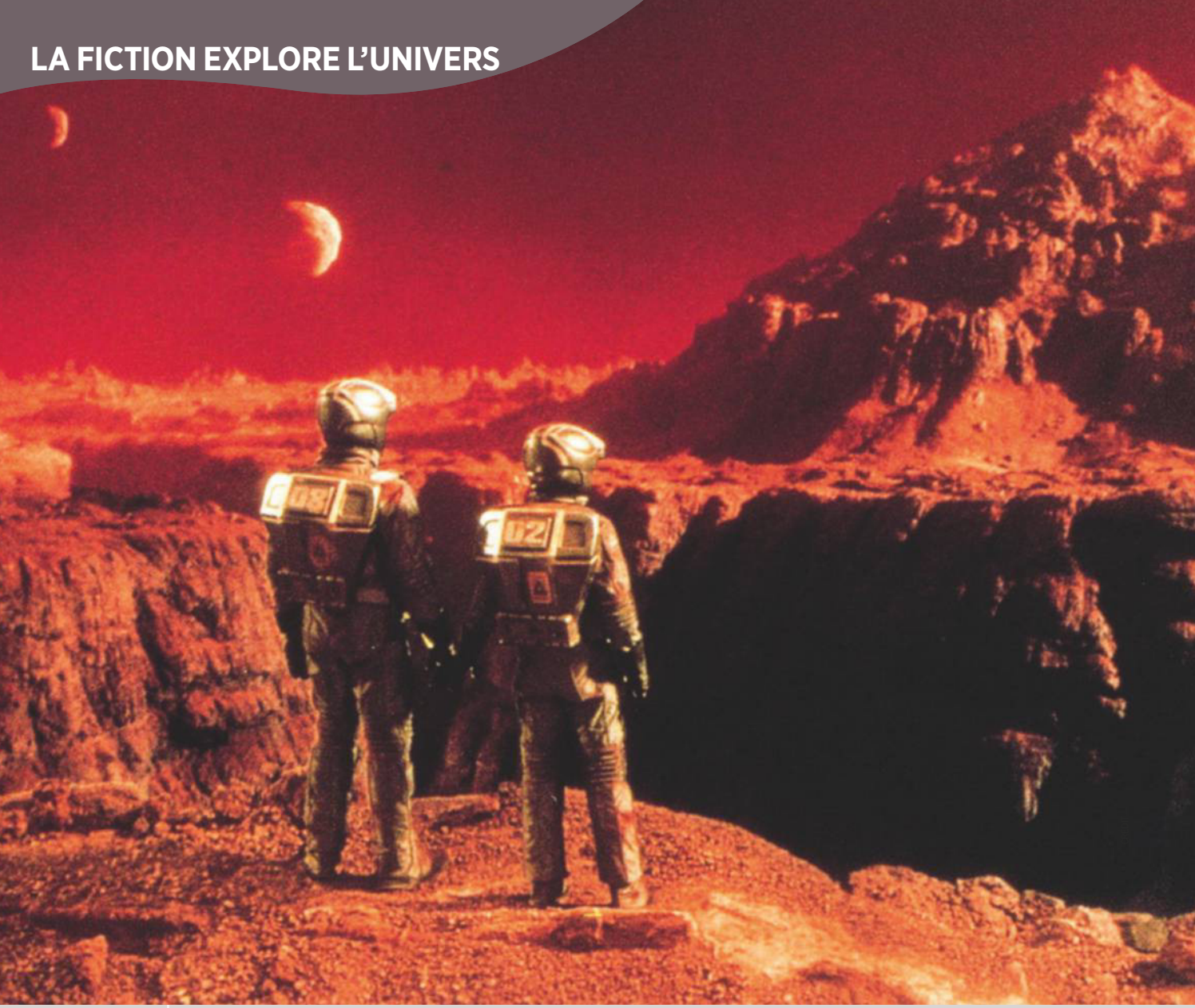
Une drogue, la chronolyse, permet de glisser d'une ligne de temps à une autre… Selon Natacha Vas-Deyres, chercheuse associée de l'université Bordeaux Montaigne, *« Jeury se revendiquait de l'univers de Dick, et il a cherché à construire un récit quantique ».* À force d'événements qui se répètent, on arrive dans une zone où le temps n'existe pas.

Le Temps incertain, Michel Jeury, Le Livre de poche, 1990.

Colonisation solaire

La jeune Swan vit sur Mercure, dans une ville mobile roulant autour de la planète afin de rester à l'opposé du Soleil… L'auteur de hard SF Kim Stanley Robinson imagine la façon dont l'humain a fait reculer les frontières de l'espace habité en colonisant le Système solaire. Sa maîtrise est presque écrasante, tant il semble avoir tout prévu des contingences de l'exploration spatiale.

2312, Kim Stanley Robinson, Actes Sud, 2017.



Films

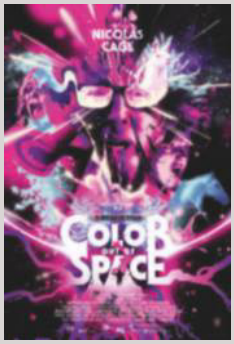
Cavale martienne à la recherche du passé

Tout ça ne vaut pas… un clair de lunes sur Mars », pourraient fredonner Quaid et Melina en escapade sur la planète rouge – lunes au pluriel, car il y en a deux : Phobos et Déimos. Les tourtereaux, incarnés par Arnold Schwarzenegger et Rachel Ticotin, expérimentent le rêve elonmuskien d'une Mars colonisée. Sur Terre, Quaid s'est payé des implants de mémoire pour s'offrir le souvenir de vacances aventureuses auxquelles un ouvrier comme lui ne peut accéder. Mais l'opération tourne au fiasco : elle réveille d'autres souvenirs… ceux de ses activités passées d'agent secret ! S'ensuit une cavale déchaînée qui l'entraîne sur Mars, où il rencontre Melina. Un amour de vacances ? On se pose la question à l'issue du récit : toutes ces péripéties sont-elles réelles, ou restituent-elles le scénario de la mémoire implantée par la société Rekall Inc. ? Telle est l'ambiguïté géniale du film de Paul Verhoeven (1990), où l'exploration du Système solaire télescope celle d'un autre univers, celui du cerveau et de la mémoire. Adapté d'un roman de Philip K. Dick, il illustre parfaitement la question récurrente que l'Américain déploie dans son œuvre : qu'est-ce que la réalité ?

Total Recall, Paul Verhoeven, 1990.

Souvenirs ou réalité : Quaid est-il vraiment allé sur Mars ou ses aventures ne sont-elles qu'un scénario implanté dans son cerveau ?

CAROLCO/TRI-STAR / EVERETT/AURIMAGES



COLLECTION CHRISTOPHEL

Attention aux hallucinations

Si tu ne viens pas à l'espace, c'est l'espace qui vient à toi… Dans *Color Out of Space*, une météorite s'écrase à proximité d'une ferme isolée. Elle diffuse insidieusement dans l'air et le sol une matière extraterrestre ravageant la nature alentour… et transformant le corps et l'esprit de ceux qui habitent à proximité. Tel Nicolas Cage, « pépère de famille » devenu en peu de temps une sorte de zébulon. Dans cette adaptation psychédélique de la nouvelle de H.P. Lovecraft, l'espace sécrète un matériau d'une couleur « qui n'existe pas », au pouvoir hallucinogène. C'est la météorite qui rend fou ! Elle déverrouille le cerveau et lui donne accès à des perceptions inhumaines. Un film qui secoue.

Color Out of Space, Richard Stanley, 2019.

Aux sources du métavers

Les États-Unis de 2045 sont devenus un enfer de bidonvilles. Pour échapper au réel, des gamers, lunettes de réalité virtuelle (VR) verrouillées au visage, passent leur vie dans des mondes numériques où ils sont incarnés par des avatars, projections fantasmées d'eux-mêmes. *Ready Player One* est adapté du roman d'Ernest Cline, qui est la référence et la source des fantasmes du métavers, ce projet d'univers virtuel sur lequel travaille la firme de Mark Zuckerberg, Facebook – justement renommée « Meta ». Sorti en 2011, le livre prophétisait la fusion de la VR et des réseaux sociaux. Ces derniers permettent d'assister uniquement en spectateur à la vie de ses relations numériques ; avec un casque de réalité virtuelle et la technologie *ad hoc*, on pourrait « le vivre » dans une utilisation partagée, assurent désormais les maîtres du web. Une utopie… ou un cauchemar ?

THE KOBAL COLLECTION/AURIMAGES

Ready Player One, Steven Spielberg, 2018.

Entre matrice et machines

Le nouveau *Matrix*, sorti en décembre 2021, est arrivé dans les salles obscures près de vingt ans après la fin de la trilogie originelle. Neo et Trinity sont de retour, et avec eux le balancement entre le monde simulé dans la matrice et celui, réel, dominé par les machines. Si ce dernier opus n'a guère fait de vagues, les précédents avaient, eux, suscité une prise de conscience du grand public quant à la révolution numérique en marche, et tout particulièrement sur le risque pour l'être humain de se voir absorbé par les univers virtuels. Ce faisant, la saga fut le catalyseur de thèmes présents bien avant elle dans la science-fiction, son *pitch* pouvant être synthétisé dans une équation : *Neuromancien + Ubik = Matrix.*

BBQ_DFY/AURIMAGES

Matrix, le film qui incarne la révolution numérique.

Matrix 4, Lara Wachowski, 2021.

WALT DISNEY/EVERETT/AURIMAGES

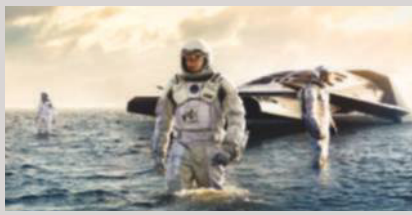
Gravitation maximale

Qu'y a-t-il de l'autre côté d'un trou noir ? Un capitaine de vaisseau spatial exalté veut en avoir le cœur net, quitte à précipiter la perte de son équipage. *Le Trou noir*, sorti en 1979, est une production Disney sous-estimée qui peut agacer par ses œillades à *Star Wars*. Mais comme le disait Hitchcock, *« meilleur est le méchant, meilleur est le film »*. Selon ce précepte, l'œuvre est excellente puisqu'elle permet au grand acteur austro-suisse Maximilian Schell de camper ce personnage d'explorateur halluciné : face au trou noir, il est comme Achab devant la baleine blanche du *Moby-Dick* d'Herman Melville.

Le Trou noir, Gary Nelson, 1979.

Voyage en raccourci

Les hypothétiques raccourcis dans l'espace que sont les trous de ver sont présentés avec une belle cohérence scientifique dans le film *Interstellar*, qui se targue d'avoir eu comme producteur associé le physicien américain Kip Thorne (futur prix Nobel). La traversée du trou de ver est le point culminant du film : à sa sortie, l'astronaute



2013 WARNER BROS ENTERTAINMENT INC./COLLECTION CHRISTOPHEL

Joseph Cooper parvient dans une sorte de bibliothèque *« qui rend concrète une idée irreprésentable,* commente la chercheuse Natacha Vas-Deyres, *l'imbrication de l'espace et du temps »*.

Interstellar, Christopher Nolan, 2014.

NETFLIX

Du monde réel au monde à l'envers

Depuis son lancement en 2016, *Stranger Things*, la série racontant les aventures d'une bande d'ados confrontés à des phénomènes paranormaux dans les années 1980, est l'une des plus regardées sur Netflix. *« Elle met en scène la confrontation de trois univers »*, relève la chercheuse Natacha Vas-Deyres. D'abord le réel, celui de la petite ville d'Hawkins ; ensuite sa version monstrueuse et dangereuse : la dimension parallèle du « monde à l'envers » – l'un des gamins, Will, y disparaît au premier épisode, et son sauvetage constitue le fil rouge de la première saison. *« Enfin, il y a l'univers mental, espace interstitiel permettant de passer d'un univers à l'autre. »* Celui-ci se manifeste dans les pouvoirs de l'étrange jeune fille surnommée Onze, qui peut, par la seule force de sa concentration, faire basculer les protagonistes des ruelles d'Hawkins aux brouillards suintant du « monde à l'envers ».

Stranger Things, sur Netflix.

Sauver l'humanité

Avec Robert A. Heinlein et Arthur C. Clarke, Isaac Asimov est l'un des « trois grands » de l'âge d'or de la SF, des années 1930 à 1950. Son cycle *Fondation* est constitué de plusieurs nouvelles et romans. Cette adaptation expose son concept de *« psychohistoire »* : une science de la divination, *« mélange de prospectivisme et de Big Data »*, selon Ariel Kyrou, essayiste et auteur de *Dans les imaginaires du futur* (ActuSF). Elle permet au mathématicien Hari Seldon de prédire que sa civilisation va s'effondrer – nous sommes 22 000 ans dans le futur et les Terriens ont essaimé dans toute la Galaxie. *« La série est intéressante,* commente Ariel Kyrou, *parce qu'elle adapte le récit original à des préoccupations plus contemporaines. »* À l'instar de Trantor, la planète capitale de l'empire galactique : Asimov avait imaginé des astres entièrement urbanisés. Y voilà injectée une dimension écologique et environnementale. La question de la préservation de notre planète est ainsi traitée en filigrane.

Fondation 850, sur la plateforme d'Apple.

APPLE TV+

CBS

Au secours, Picard !

Leurs noms et renommées sont proches. Mais il y a une différence majeure entre *Star Wars* et *Star Trek*. La première se situe *« dans une galaxie très lointaine »* ; il n'est jamais question de notre planète. Dans *Star Trek*, en revanche, les explorateurs du cosmos sont originaires de la Terre (sauf Spock, qui est Vulcain). Et l'aventure spatiale devient humaniste. *« C'est patent à partir de "Star Trek : la nouvelle génération" où le réflexe guerrier dans l'exploration des frontières de l'Univers cède la place à celui de la découverte,* commente Ariel Kyrou. *La logique de colonisation disparaît au profit de celle d'une solidarité avec les civilisations extraterrestres, par essence différentes de nous. »* Le capitaine Picard, interprété par Patrick Stewart, poursuit cette approche marquée d'humilité dans ce dernier opus. Âgé et malade, il préférerait rester sur Terre à s'occuper de ses vignes, mais il accepte de reprendre du service pour venir en aide à des créatures maltraitées. Un saint homme.

Star Trek : Picard, sur la plateforme d'Amazon.

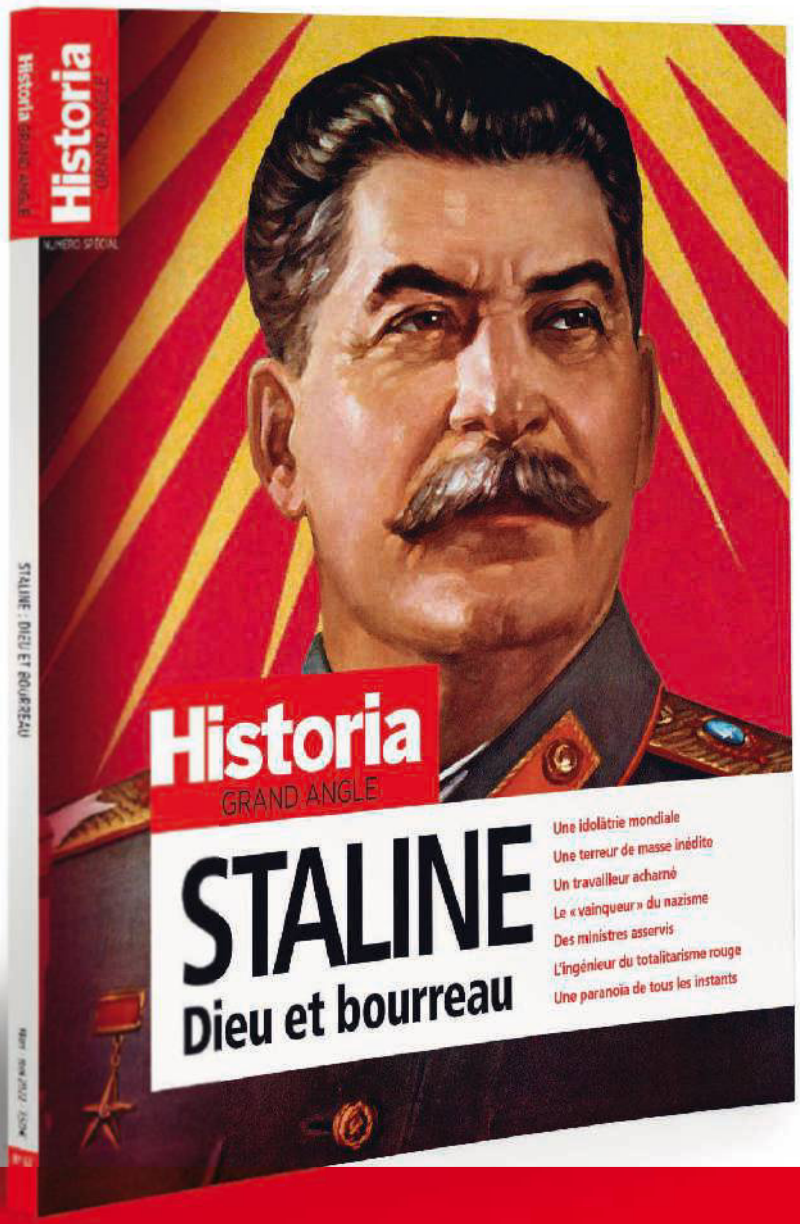
Séries

Historia GRAND ANGLE

NOUVEAU

Magazine-livre

TRIMESTRIEL



HISTORIA GRAND ANGLE, c'est un rendez-vous de référence avec les meilleurs historiens, un point de vue qui cerne l'essentiel, une grille chronologique, un lexique pour ne jamais perdre pied et un traitement visuel privilégié : nombreuses infographies et illustrations.
Ce sont aussi des rubriques inédites : un fait divers, une BD, des textes bruts, un récit gastronomie, un fact-checking...
Des histoires au service de l'Histoire.

CHEZ VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX ET CHEZ VOTRE LIBRAIRE

Fut-il le chef militaire de génie qui fit chuter Hitler ? Fut-il l'inventeur d'un système totalitaire inédit où la purge permet de renouveler les élites ? Reste-t-il la référence nationaliste russe inégalable pour le Kremlin en 2022 ? HISTORIA GRAND ANGLE a mis à plat cet enchevêtrement de cauchemars et de rêves dont Staline fut porteur.

RIVAGES
DU MONDE

Prendre le large, c'est essentiel.

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – Crédit Dreamstime

Croisières
EXPÉDITIONS

NORVÈGE • ARCTIQUE • ISLANDE • GROENLAND • SPITZBERG

A bord d'un véritable yacht d'expédition, conçu pour 180 passagers.
Un navire à propulsion hybride, pouvant stationner sans jeter l'ancre, pour une meilleure protection des sanctuaires marins. Des conférenciers spécialistes des régions polaires présents à bord.

SA01

Voguer. Échanger. Rêver

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR